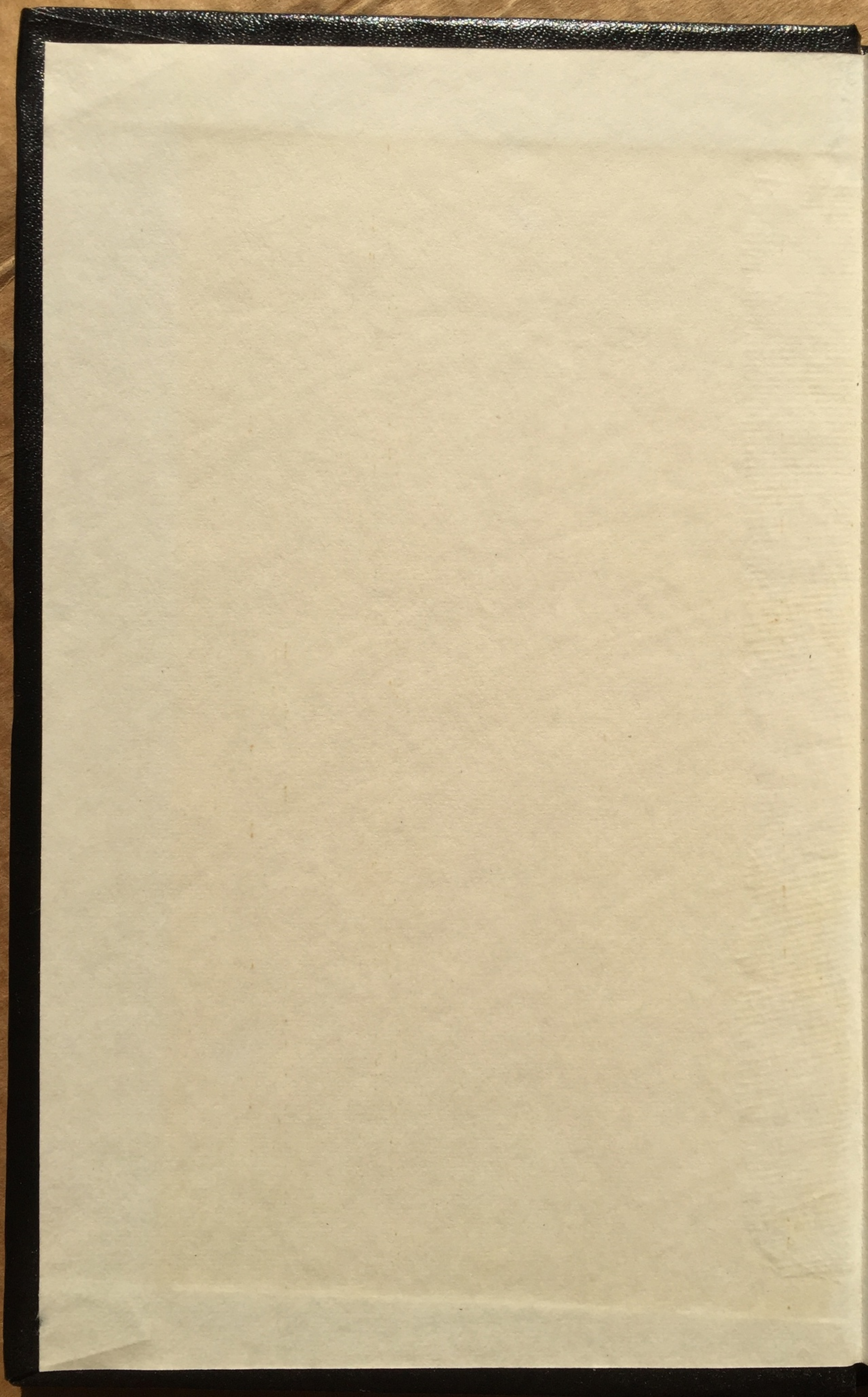




С. М. РЕПРИНЦЕВА
Н. В. ФЕДОРОВИЧ

НОВЫЕ МЕТОДЫ
ТЕРМООБРАБОТКИ
И СУШКИ ХИМИКО-
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ
ПРЕПАРАТОВ



АКАДЕМИЯ НАУК
ИНСТИТУТ ТЕПЛОТЕХНИКИ

НАУКА И ТЕХНИКА

С. М. РЕПРИН

НОВЫЕ

ТЕРМООБОРАБОТКА

И СУШКА

ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ

ПРЕПАРАТОВ

Под редакцией
члена-корреспондента
Б. М. СМОЛОВА

МИНСК «НАУКА

АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛОРУССКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ТЕПЛО- И МАССООБМЕНА

НАУКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

С. М. РЕПРИНЦЕВА, Н. В. ФЕДОРОВИЧ

НОВЫЕ МЕТОДЫ
ТЕРМООБРАБОТКИ
И СУШКИ ХИМИКО-
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ
ПРЕПАРАТОВ

Под редакцией
члена-корреспондента АН БССР
Б. М. Смольского

МИНСК «НАУКА И ТЕХНИКА» 1979

6П2.27

P41

УДК 661.12.047

Репринцева С. М., Федорович Н. В. Новые методы термообработки и сушки химико-фармацевтических препаратов. Мн., «Наука и техника», 1979, 248 с.

Впервые выполнена классификация лекарственных и витаминных препаратов как объектов сушки. Приведены математические модели сушки в падающем и кипящем слое, позволяющие теоретически рассчитать конечный результат процесса при заданных параметрах и определить возможность сушки любых препаратов в аппарате СМК. Рассмотрены преимущества серийного выпуска аппарата СМК, анализируются результаты внедрения его на предприятиях медицинской промышленности и возможность широкого использования в других отраслях. На основе разработанной конструкции сушилки предлагается создание первой в мире механизированной поточной линии производства таблетированных препаратов, которая позволит значительно повысить культуру производства и качество выпускаемой продукции.

Книга предназначена для специалистов химико-фармацевтической и смежных с ней отраслей промышленности, инженеров, занятых проектированием сушильных установок, студентов химико-технологических специальностей вузов.

Таблиц 1. Иллюстраций 81. Библиография — 154 названия.

Рецензенты:

доктор технических наук Н. Б. Рашковская,
доктор технических наук З. И. Жуковская

30304—098

P 120—79 2303010000

M316—79

© Издательство «Наука и техника», 1979.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
-----------------------	---

ГЛАВА 1

Современное состояние техники сушки в химико-фармацевтической промышленности	5
--	---

ГЛАВА 2

Химико-фармацевтические препараты как объекты сушки и их классификация	18
--	----

2.1. Структура и классификация химико-фармацевтических препаратов в зависимости от различных факторов	18
2.2. Определение сорбционно-десорбционных, реологических, теплофизических характеристик химико-фармацевтических препаратов	25
2.3. Определение реологических характеристик химико-фармацевтических материалов	51
2.4. Исследование теплофизических характеристик	63

ГЛАВА 3

Механизм и особенности сушки дисперсных химико-фармацевтических материалов при использовании предложенных методов	70
---	----

3.1. Отличительные особенности и преимущества новых методов сушки	70
3.2. Методики экспериментального исследования закономерностей сушки химико-фармацевтических материалов	78
3.3. Результаты экспериментального изучения механизма сушки химико-фармацевтических материалов	105
3.4. Теоретическое обоснование предложенных методов сушки и алгоритмы их расчетов	124

ГЛАВА 4

Промышленное освоение новых методов сушки и конструкция сушильных установок	148
4.1. Опытное-промышленное освоение нового метода сушки пастообразных материалов	154
	245

4.2. Экономическая эффективность внедрения сушильных устройств и перспектива использования их в других отраслях промышленности	155
--	-----

ГЛАВА 5

Технологический процесс производства гранулированных и таблеточных материалов, обеспечивающий поточность и управление на основе новых способов сушки	162
5.1. Основные характеристики таблеточной массы, определяющие эффективность непрерывной технологии производства таблеток	168
5.2. Технологическая схема и конструктивные узлы поточной линии	169
5.3. Технические показатели работы поточной линии, результаты опытно-промышленного освоения и перспективы использования	176
Приложение 1	184
Приложение 2	227
Литература	234

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предприятия медицинской промышленности выпускают широкий ассортимент лекарственных препаратов, из них около 80% составляют таблетлируемые. Выпуск продукции с каждым годом увеличивается, появляются новые виды препаратов. Промышленность, обеспечивающая это, должна быть оснащена современным прогрессивным оборудованием.

Однако в настоящее время оборудование химико-фармацевтической промышленности все еще остается на низком уровне, что не позволяет внедрять новые технологии производства. Это в полной мере относится к тепловым и массообменным процессам.

Процесс сушки, широко распространенный в этой отрасли, является наиболее энергоемким, трудоемким процессом, который в значительной степени определяет качество готовой продукции. Между тем до настоящего времени осуществляется он малоинтенсивными методами с широким использованием ручного труда.

Мировая промышленность, производящая лекарственные таблетлируемые формы, не имеет поточности и не автоматизирована. В то же время создание таких процессов особенно важно, так как использование их позволяет управлять качеством препарата и получать лучшие, более эффективные образцы лекарственной продукции.

В отечественной литературе имеются специальные монографии, обобщающие теоретические разработки и практические рекомендации по вопросам сушки дисперсных материалов в кипящем, взвешенном слое (например, монографии И. Г. Романкова, Н. Б. Рашковской, А. С. Гинзбурга и др.). Использование этих материалов позволяет создать ряд прогрессивных аппаратов и наладить наиболее эффективный сушильный процесс дисперсных материалов в химико-фармацевтической промышленности.

Однако монографий, рассматривающих специфичность химико-фармацевтических производств, особенности этих материалов как объектов сушки мало, и авторы надеются настоящей работой пополнить этот пробел.

Работы, проведенные ордена Трудового Красного Знамени ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР с предприятиями и организациями медицинской промышленности в течение 1968—1975 гг., привели к созданию принципиально нового оборудования для тепломассообменных процессов: сушилок непрерывного действия (СМК) и поточной линии ЛП-1. Внедрение этих аппаратов позволило интенсифицировать процессы сушки, механизировать трудоемкие процессы, совместить ряд процессов, улучшить условия труда и культуру производства, создать новые технологии производства таблеточных форм.

Настоящая монография посвящена новым методам сушки и технологии таблеточных форм химико-фармацевтических материалов, разработанным авторами. Книга написана на материале исследований, выполненных в ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР.

Авторы выражают благодарность К. Г. Чижику, В. Л. Драгуну за участие в совместной работе по изучению новых методов сушки; СКБ с ОП ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР за разработку технической документации и изготовление опытных образцов; О. Л. Тютенкову, Н. С. Золотареву, З. Г. Тхоревской, П. Н. Макаренко, О. П. Шанович, Н. Н. Козловой, З. И. Хлыстовой, М. Ф. Чернявскому, Г. Л. Дониной, М. К. Пурик за активное участие во внедрении нового оборудования.

Авторы благодарят научного редактора члена-корреспондента АН БССР Б. М. Смольского, а также рецензентов Н. Б. Рашковскую, З. И. Жуковскую за ценные советы и замечания по рукописи.

Главы 1, 3, 4, 5 написаны С. М. Репринцевой, глава —2 Н. В. Федорович, параграфы 3.2, 3.3 — совместно.

СОВРЕМЕННЫЕ
В ХИМИЧЕСКОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ

дицине, ч
Получают
ботки раст
(путем хим
дуктов жи
Процесс с
трудно най
нялся. Су
ленности —
щий техно
готовке сы
фармакопе
Останов
ставляющи
содержани
раты, прод
водства ви
тики, отход
ричную пер
мицелия и т
На дейс
промышлен
шкафные с
отвечают
приспособл
гоемки, не с
ные сушиль
ровать каче

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТЕХНИКИ СУШКИ В ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Лекарственные средства, применяемые в медицине, чрезвычайно разнообразны и многочисленны. Получают их различными путями и способами переработки растительного или животного сырья искусственно (путем химического синтеза) либо с использованием продуктов жизнедеятельности некоторых микроорганизмов. Процесс сушки — широко распространенный процесс, трудно найти такое производство, где бы он не применялся. Сушка в химико-фармацевтической промышленности — наиболее энергоемкий, трудоемкий и ведущий технологический процесс, применяющийся при подготовке сырья, высушивании промежуточных продуктов, фармакопейных веществ, в таблеточном производстве.

Остановимся на процессе сушки материалов, представляющих собой дисперсные системы с различным содержанием жидкой фазы: все таблетлируемые препараты, продукты и полупродукты синтетического производства витаминных и лекарственных средств, антибиотики, отходы производств, которые поступают во вторичную переработку, например жом облепихи, паста мицелия и т. д. [1—4].

На действующих заводах и фабриках медицинской промышленности находят широкое применение полочные, шкафные сушилки, которые по всем показателям не отвечают современным требованиям технологии, — не приспособлены к автоматическому регулированию, энергоемки, не обеспечивают интенсивности процесса. Полочные сушилки практически не дают возможности регулировать качество получаемого сухого продукта, так как

сушка происходит в слое. Кроме того, имеются градиенты температур и давлений, которые приводят к получению нестабильного по всем показателям высушиваемого материала.

На ряде химико-фармацевтических заводов используются барабанные сушилки, улучшающие условия работы, механизрующие выгрузку материала, но не позволяющие значительно интенсифицировать процессы переноса тепла и массы, обладающие большой энергоемкостью и инерционностью. Эти сушилки не пригодны для термолабильных материалов.

В различных областях промышленности за последние десятилетия получили распространение скоростные методы конвективной сушки дисперсных материалов: сушка во взвешенном состоянии, в кипящем и фонтанирующем слоях и всевозможная их комбинация. Сушка в этих устройствах обеспечивает интенсивные условия тепло- и массообмена путем развития поверхностей теплообмена, повышенных температур и достаточно больших скоростей сушильного агента [5]. Однако применение этих методов в химико-фармацевтической промышленности началось сравнительно недавно.

В 1958 г. Уорстер предложил методику и аппаратуру для нанесения покрытий на лекарственные частицы. Затем Зингизер и Лауэнталь, изменив конструкцию аппарата, применили его для сушки и нанесения пленочных покрытий на таблетки [6].

В 1962 г. Скотт, Либерман и другие рекомендовали использовать сушку в кипящем слое гранулята, полученного влажной грануляцией в отдельном грануляторе. Для сушки применялась сушилка фирмы «Вернер Глатт» (ФРГ) периодического действия [7, 8]. В аппарате осуществлялось смешивание, гранулирование и сушка, на которые затрачивалось соответственно 1—2, 10 и 30 мин [9].

В 1964 г. Скотт с сотрудниками предложил уже непрерывный способ производства гранулята в псевдооживленном слое [7—9].

В настоящее время кипящий слой начал входить в химико-фармацевтическую промышленность как процесс, решающий вопросы интенсификации сушки и улучшения всех показателей производства.

На предприятиях медицинской промышленности для

сушки единичных продуктов или их отдельных групп применяются сушилки со взвешенным слоем (пневматические, аэрофонтанные, фонтанирующего слоя), для сушки кристаллических материалов, например сульфамидных препаратов и т. д., выдерживающих значительную температуру и содержащих поверхностную влагу,— пневмосушилки [10—12]. Однако, обладая преимуществами перед полочными и вакуумными сушилками, они все же имеют следующие недостатки: невозможность сушки продуктов до низкой остаточной влажности ввиду кратковременности пребывания частиц в потоке теплоносителя; значительный унос высушенного материала ($W=1,5\%$) после циклона; большие расходы воздуха и энергии; измельчение и истирание материала; большие высоты труб-сушилок. Поэтому они широко не применяются в отечественной медицинской промышленности.

Одновременно были проведены работы по проверке возможности применения в медицинской промышленности аэрофонтанных сушилок [13—15]. Был использован опыт эксплуатации их в химической промышленности. Разработана и внедрена аэрофонтанная сушилка для сушки аспирина [16, 17]. С. Г. Барашков исследовал сушку сульгина, норсульфазола, анестезина и др. [19]. В аэрофонтанных сушилках высушиваются в настоящее время порошки норсульфазола, анестезина, сульфадимезина, сульгина [18, 20].

Для высушивания витаминных продуктов и полупродуктов А. А. Соколовским и другими неоднократно использовались вихревые сушилки [21, 22], например, сушка тиамин-бромиды исследовалась в установке производительностью 2,5 кг/ч сухого продукта, расход воздуха составлял 6—8 кг/кг продукта (рис. 1).

В промышленной установке с вихревой камерой исследовалась сушка гидрата диацетон 2-кетон-*l*-гулоновой кислоты. Схема сушилки представлена на рис. 2. Подача влажного материала осуществлялась вакуумом из центрифуги 1 в бункер 2, а затем через турникет 3 в противочный бункер 4, откуда шнеком 5 масса попадала в эжектор и в вихревую камеру 8. Теплоноситель (воздух) нагнетался вентилятором 7 через калорифер 6 и эжектор в вихревую камеру. Высушенный продукт уносился в циклон 9 и транспортером 11 собирался в бункере 12. Пыль улавливалась фильтром 10 с вентилятором 13.

Несмотря на ряд преимуществ, аэрофонтанные сушилки не могут относиться к числу наиболее перспективных для сушки медицинских препаратов. Сушка кристаллических материалов сопровождается истиранием кристаллов, потерей блеска и разрушением формы, что является недостатком. При сушке гранул не обеспечиваются равномерность конечной влажности и нужный диа-

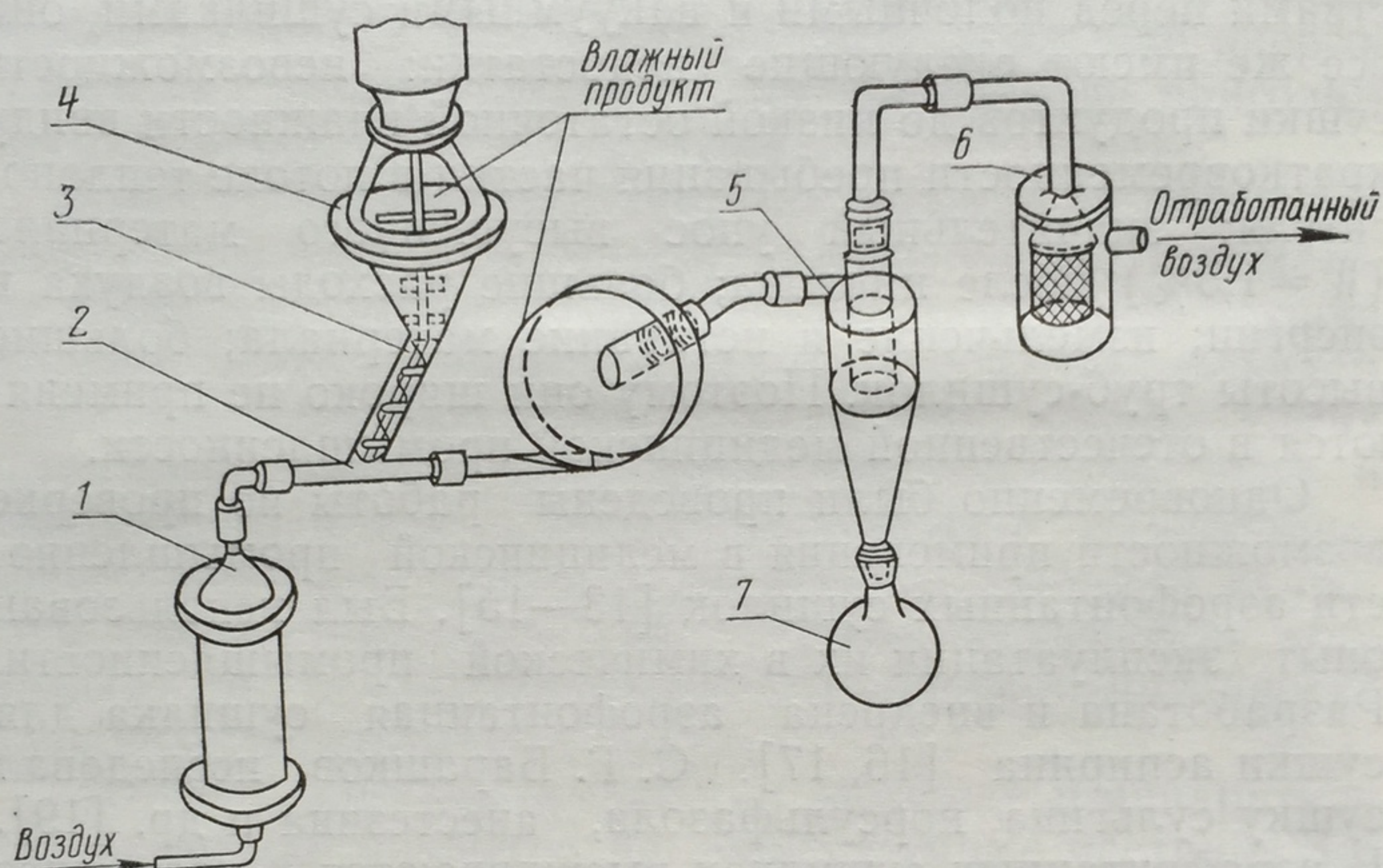


Рис. 1. Схема лабораторной вихревой сушилки: 1 — электрокалорифер; 2 — пневмоэжектор; 3 — шнековый питатель; 4 — бункер питателя; 5 — вихревая камера и циклон; 6 — рукавный фильтр; 7 — сборник готового продукта

пазон фракционного состава. Значителен процент потерь материала. Кроме того, возникает необходимость создания специальных устройств для очистки большого количества воздуха [23].

На некоторых химико-фармацевтических заводах (Анжеро-Судженском) применяются сушилки виброаэрокипящего слоя (ВАКС) для сушки кофеина, амидопирин, сульфадиметоксина. Сушильная камера представляет собой короб прямоугольной конфигурации. Вибрация камеры осуществляется с помощью эксцентрикового привода. Напряженность сушилок по влаге не превышает $50-100 \text{ кг/м}^3 \cdot \text{ч}$. Унос в циклон составляет $3-15\%$, а для мелкодисперсных, сульфадиметоксина — $40-45\%$ [24].

За рубежом в химико-фармацевтической промышленности используются сушилки периодического действия фирм «Аэроматик», «Мюнстерн», «Глатт» и др. Принцип работы этих сушилок заключается в следующем (рис. 3). Высушиваемый препарат загружается в прозрачный коническо-цилиндрический контейнер 6, дно которого выполнено из листа перфорированной стали, покрытого

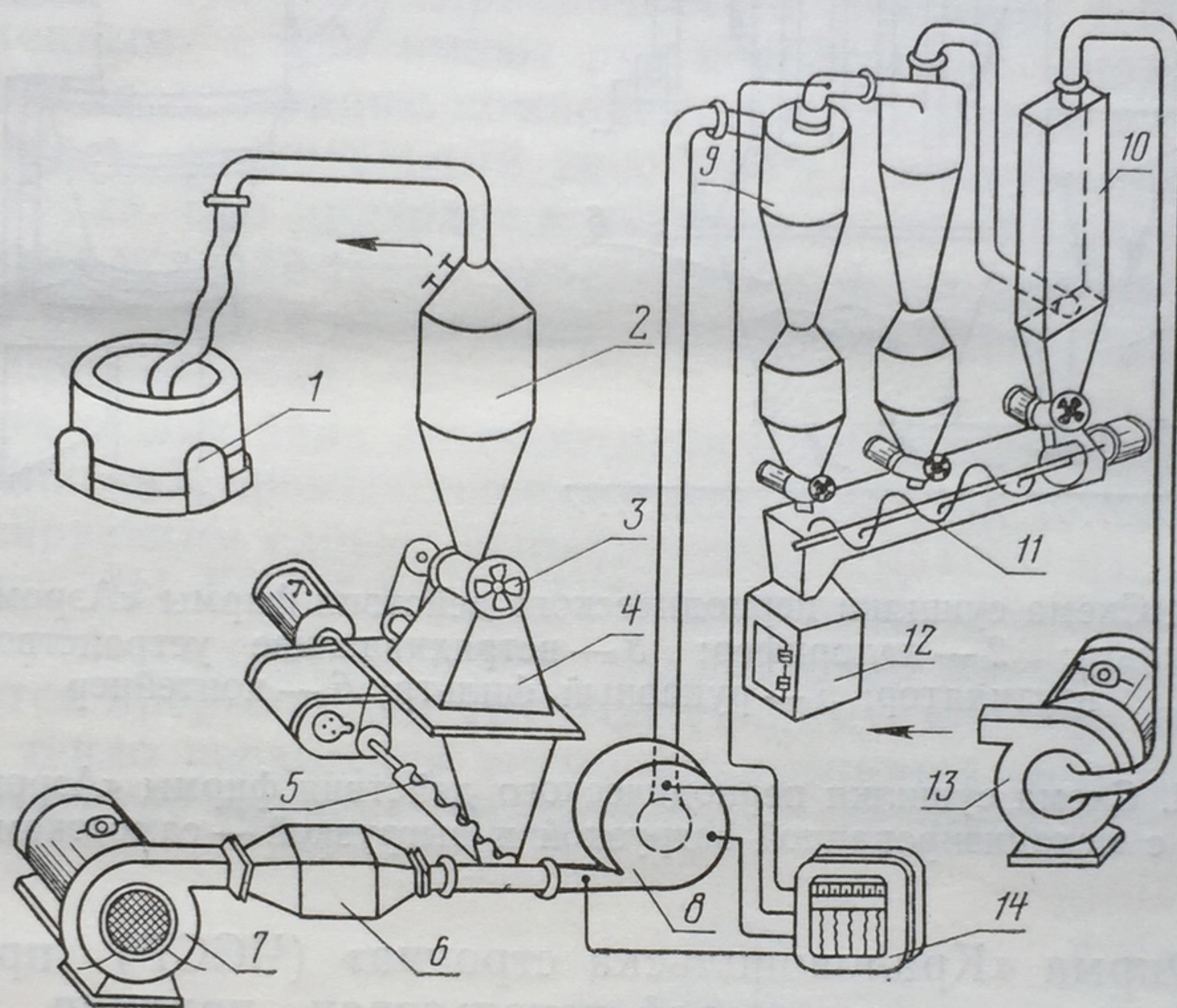


Рис. 2. Схема промышленной вихревой сушилки

нержавеющей металлической сеткой. Необходимая для псевдоожижения скорость воздуха создается вентилятором высокого давления 4, встроенным в верхнюю часть сушилки. Перед началом сушки контейнер стыкуется с кассетой рукавных фильтров 5, снабженных встряхивающим устройством 3. Время сушки одной загрузки 20—60 мин. Сушилки фирмы «Аэроматик» имеют восемь модификаций с единичной загрузкой от 2 до 200 кг, снабжены устройством для отвода статического электричества и пультом управления. Применяются следующие способы механизированной загрузки и выгрузки материала: самотек (рис. 4), с помощью вакуума (рис. 5), с помощью подъемника с опрокидывающейся емкостью (рис. 6).

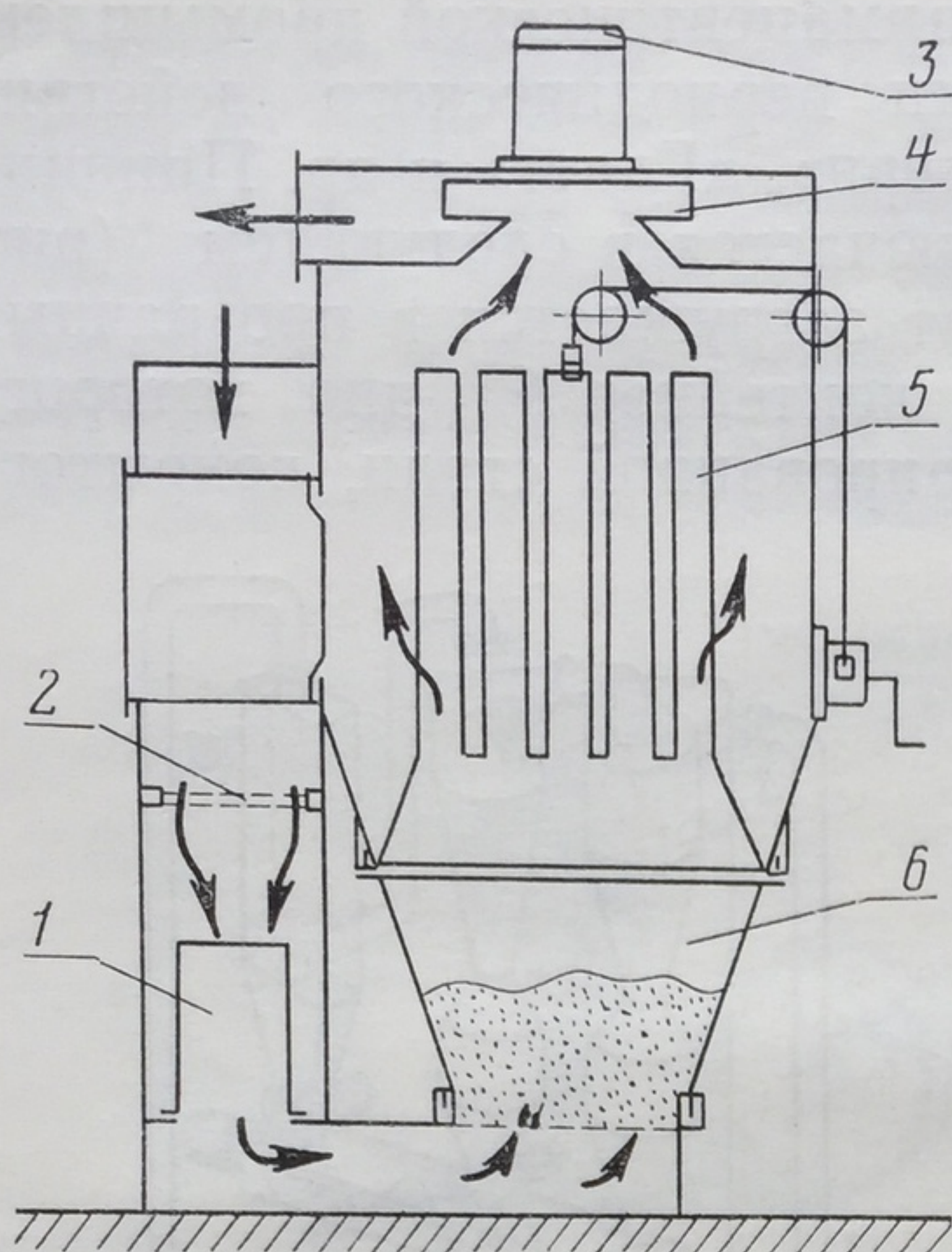


Рис. 3. Схема сушилки периодического действия фирмы «Аэроматик»: 1 — фильтр; 2 — калорифер; 3 — встряхивающее устройство; 4 — вентилятор; 5 — рукавный фильтр; 6 — контейнер

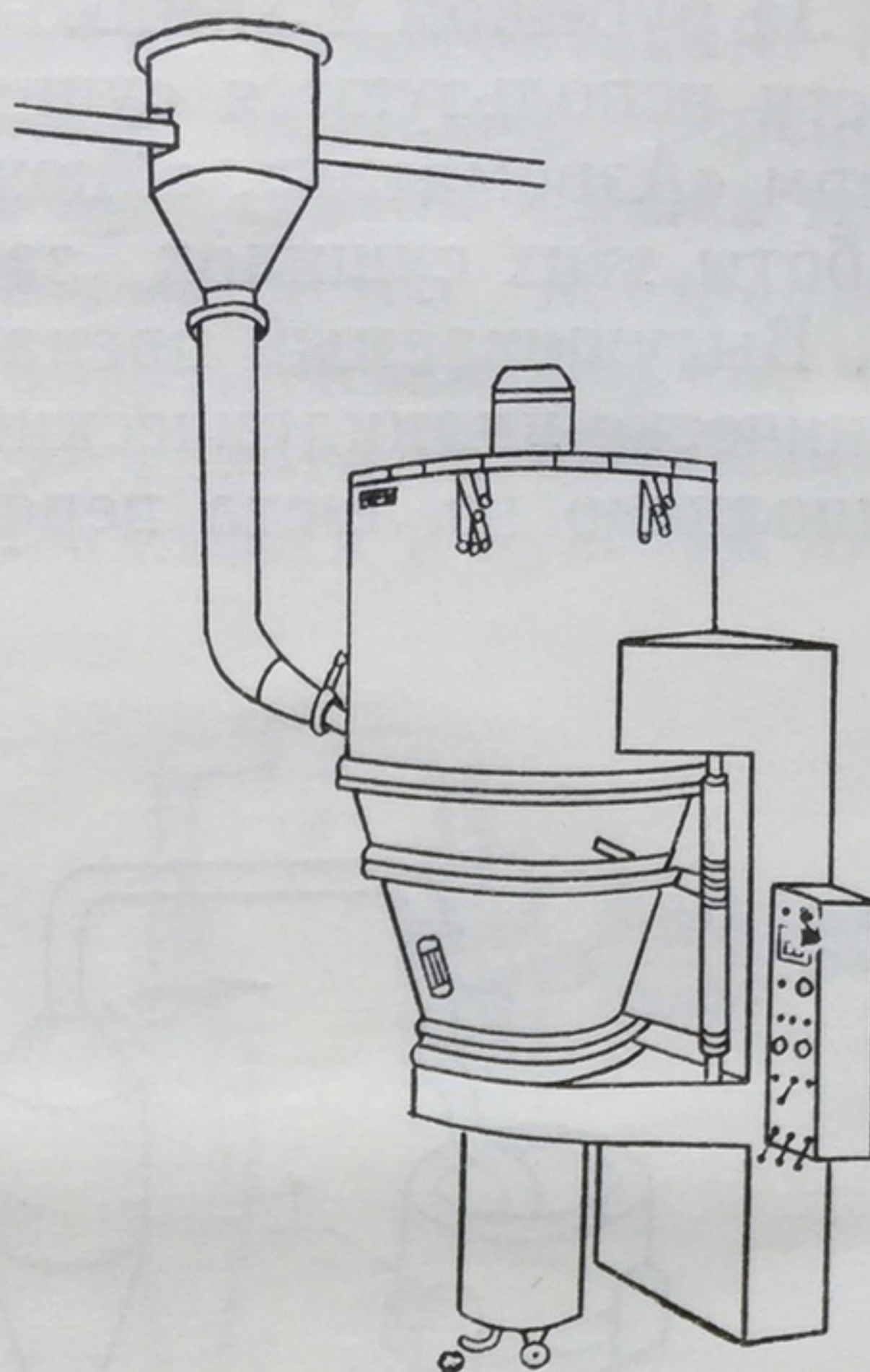


Рис. 4. Схема сушилки периодического действия фирмы «Аэроматик» с механизированной загрузкой и выгрузкой — самотеком

Фирма «Кроловопольска строина» (ЧССР) предложила сушилку, в которой использован принцип карусельных сушилок с кипящим слоем, сочетающих периодический процесс с непрерывным. Сушильная камера разделена радиальными перегородками на несколько вертикальных отсеков, вращающихся вокруг оси камеры до сектора выгрузки сухого продукта, который не имеет газораспределительной решетки. Это позволяет в одном аппарате сочетать непрерывную загрузку и выгрузку продукта с сушкой его в условиях периодического процесса. Процесс сушки заканчивается за один оборот вращающегося сектора сушилки.

В Советском Союзе применяются порционные сушилки типа СП с единичной загрузкой 30, 60, 100 кг, выполненные по аналогии с сушилкой фирмы «Аэроматик». СПКБ Минмедпрома была разработана сушилка СГ, в которой используется принцип кипящего слоя для получения гранулята в таблеточном производстве при распы-

ливании
слоя. Эти
выполнен
9], ставя
точного
цессы гр
ления (с
Одна
ожженн
материал
ным веса
ного труд
нических
троля пр
цикл про
Для с
медицинс
пульсир
Лыкова
этих суши
дувается
ха, а теп
поверхнос

Рис. 5. Схе
с ме

ливании связующего раствора на зеркало кипящего слоя. Эти работы, являясь продолжением исследований, выполненных Уорстером-Скоттом в конце 50-х годов [6, 9], ставят своей целью получение гранулята для таблеточного производства, т. е. в них рассматриваются процессы гранулирования в кипящем слое методом распыления (см. гл. 5).

Однако сушилки периодического действия с псевдоожигенным слоем имеют ряд недостатков: истирание материала, сепарацию компонентов по размерам и удельным весам, значительный унос (0,5%), применение ручного труда. Это приводит к ухудшению санитарно-гигиенических условий труда, невозможности постоянного контроля процесса и включения аппаратов в непрерывный цикл производства.

Для сушки ряда антибиотиков на некоторых заводах медицинской промышленности используются сушилки с пульсирующим слоем, разработанные в ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР С. С. Забродским. Принцип работы этих сушилок состоит в том, что влажный материал продувается прерывистым (пульсирующим) потоком воздуха, а тепло передается терморadiационным методом от поверхностей нагрева. Вследствие нестационарного по-

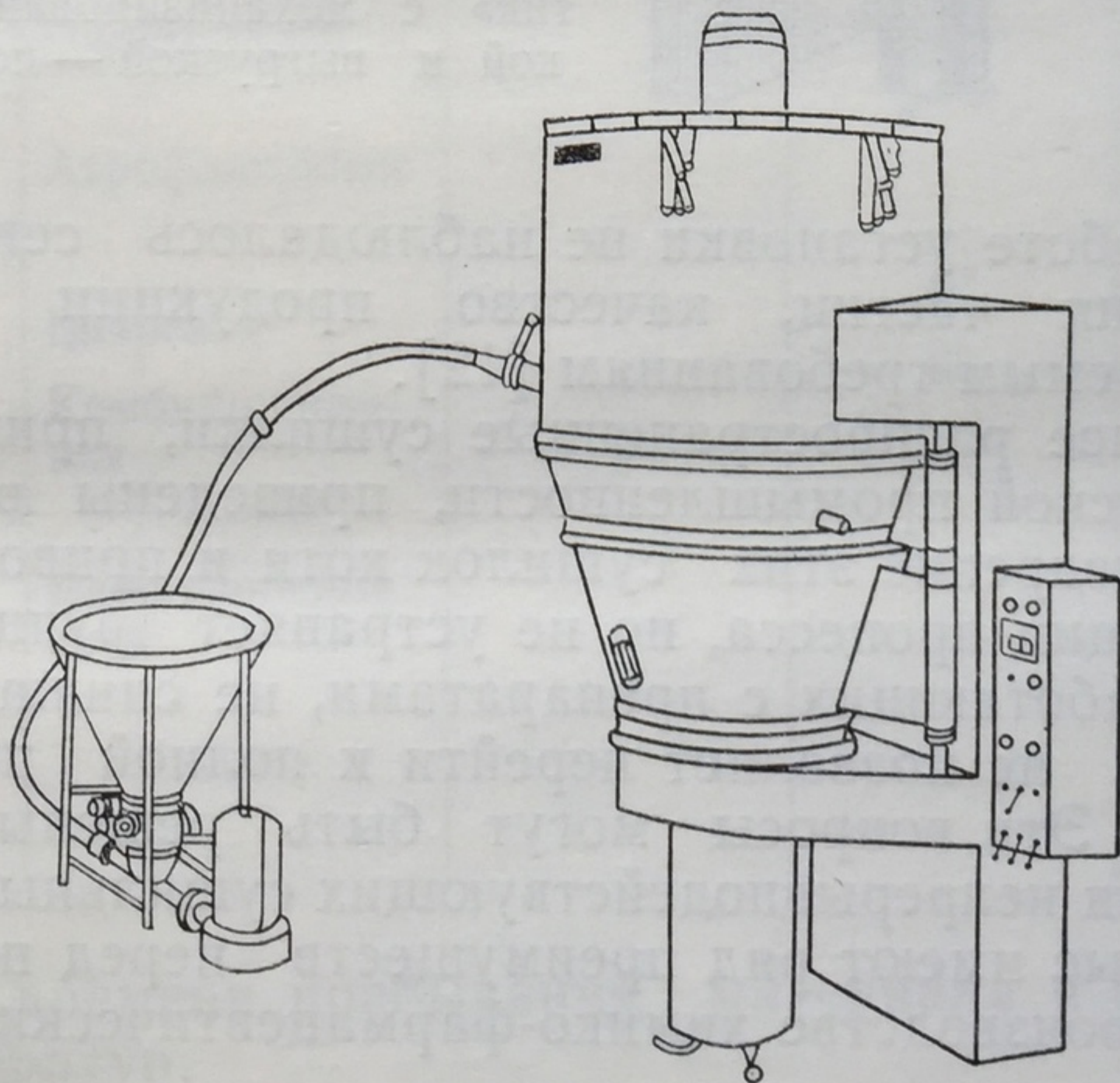
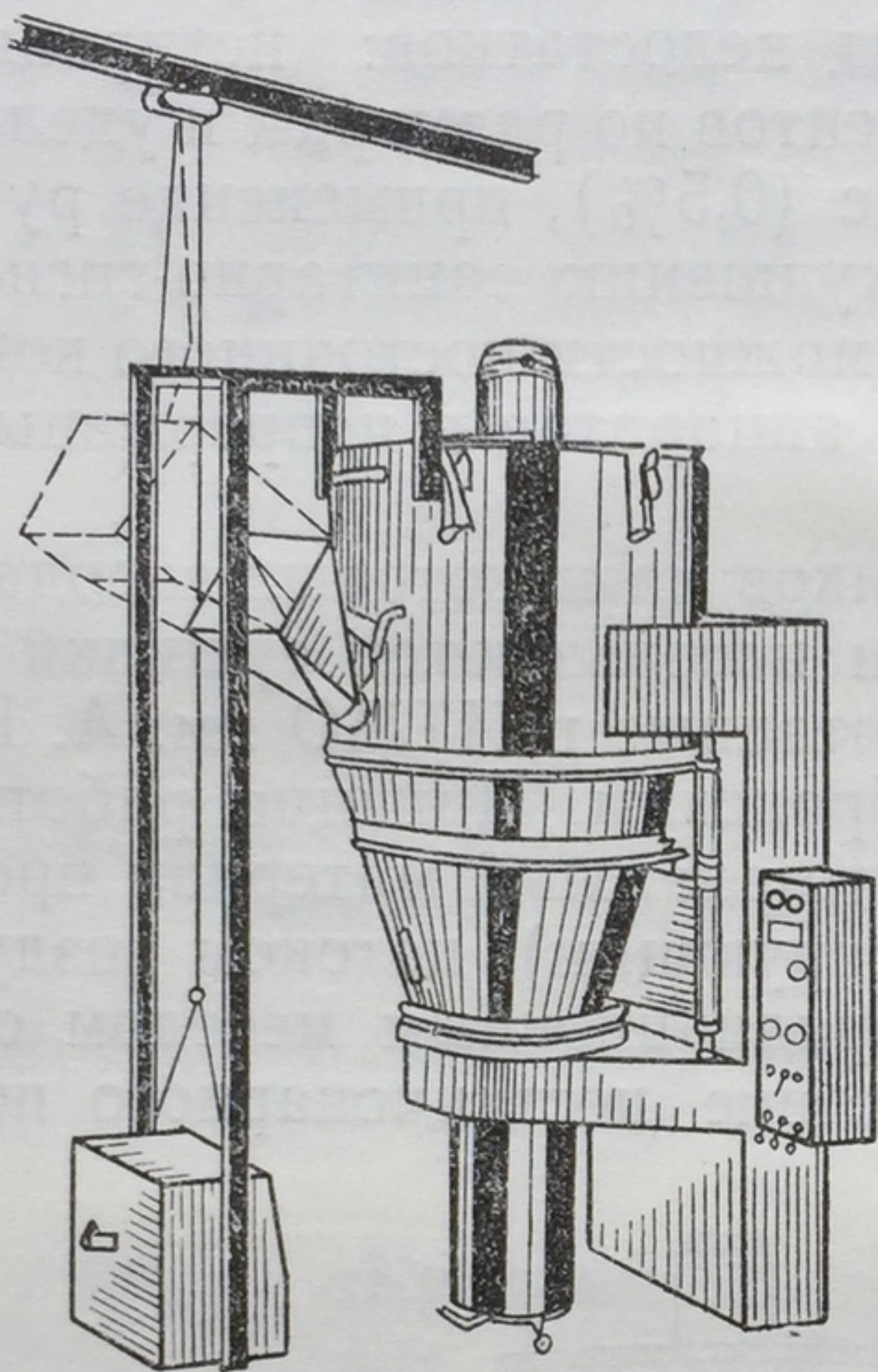


Рис. 5. Схема сушилки периодического действия фирмы «Аэроматик» с механизированной загрузкой и выгрузкой — вакуум

тока газа непрерывно изменяется укладка частиц материала, обеспечивающая интенсивную сушку при незначительном истирании материала (рис. 7).

Сушилка состоит из цилиндрической колонны с конической верхней частью 4, нагнетателя 1, рессивера 2 для сглаживания пульсаций при изменении расхода воздуха, пульсатора 3, электрокалорифера 6 и насоса 7.



Установка имеет наружный обогрев, а для более равномерного подвода тепла к слою сушеного материала по оси цилиндрической камеры размещен трубчатый греющий элемент 5. Единичная загрузка колеблется от 2 до 35 кг. По сравнению с вакуумными сушилками время сушки сокращается в 3 раза.

Рис. 6. Схема сушилки периодического действия фирмы «Аэроматик» с механизированной загрузкой и выгрузкой — подъемником

При работе установки не наблюдалось сепарации и измельчения частиц, качество продукции отвечало предъявляемым требованиям [12].

Наиболее распространенные сушилки, применяемые в медицинской промышленности, приведены в таблице. Однако внедрение этих сушилок хотя и приводит к интенсификации процесса, но не устраняет ручной труд, контакт работающих с препаратами, не снижает потерь продуктов, не позволяет перейти к полной поточности процесса. Эти вопросы могут быть решены в случае применения непрерывнодействующих сушильных аппаратов, которые имеют ряд преимуществ перед периодическими в производстве химико-фармацевтических препаратов:

1) возможность повышения качества продукта за счет создания стационарного процесса сушки и мини-

Сушилки, применяемые в медицинской промышленности

Высушиваемый материал	Тип сушилки	Данные о внедрении	Производительность, кг/ч	Способ механизации загрузки и выгрузки
Таблетированные препараты	СП-30, СП-60, СП-100, сушилка кипящего слоя периодического действия	На предприятиях медицинской промышленности	Единовременная загрузка, кг: 30, 60, 100	С применением ручного труда
Тетрациклин и другие антибиотики	СПС, сушилка периодического действия с пульсирующим слоем	Минский, Пензенский и Рижский заводы медицинских препаратов	Единовременная загрузка, кг	Загрузка с помощью пневматики
Таблетированные препараты	«Аэроматик», сушилка КС периодического действия с непрерывным оформлением процесса	Казанский химико-фармацевтический завод		
Стрептоцид, аспирин	«Мюнстер», периодического действия	То же	От 5 до 70	
Аспирин, тетрациклин	Пневмотруба		200 125	Шнек
Норсульфазол, сульгин, кальцекс, гидрат	Аэрофонтанная		67	
Сульгин, сульфадимезин, салол	Вихревая		60	
Кофеин, сульфадиметоксин, амидопирин	Комбинированная		80	
	Виброкипящий слой			

мального времени пребывания материала в зоне высоких температур;

2) интенсификация процесса в результате контактного тепло- и массообмена;

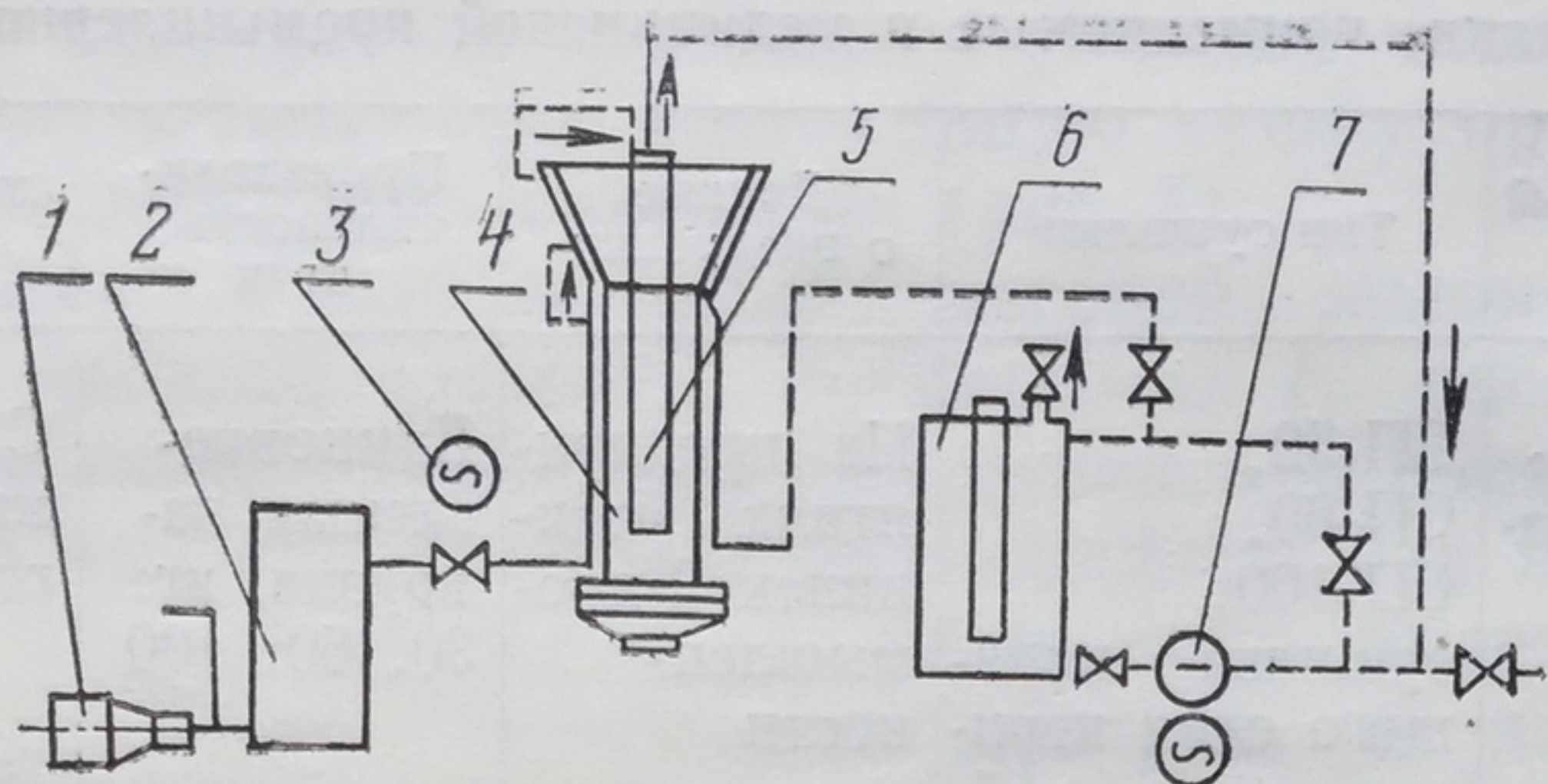


Рис. 7. Схема сушильной установки с пульсирующим слоем

3) возможность обрабатывать материалы газовым теплоносителем с максимально высокой температурой;

4) осуществление тонкой регулировки параметров процесса по температуре и времени без изменения производительности аппарата;

5) возможность создания наиболее безопасных условий работы с точки зрения отвода зарядов статического электричества.

Несмотря на преимущества таких сушилок, в медицинской промышленности их использование некоторыми авторами оспаривается [18]. Объясняется это тем, что основным мотивом создания непрерывного процесса сушки является высвобождение обслуживающего персонала и повышение производительности труда. Это приносит наибольшие выгоды в крупнотоннажном производстве, а, например, для таблеточного, малотоннажного производства они минимальны.

С нашей точки зрения такой подход не является оправданным, так как следует учитывать вредность производства, зависимость качества продукта от метода сушки, необходимость автоматического контроля процесса и ликвидации потерь дорогостоящего продукта.

Рассмотренные устройства, однако, не исчерпывают всех возможных вариантов использования прогрессивных методов сушки в химико-фармацевтической промышленности. Очевидные положения недостаточной эффективности процессов сушки в данной отрасли отмечаются специалистами, работающими в этой сфере производства и научного исследования. Поэтому закономерно стремление интенсифицировать процесс сушки, разработать и внедрить на химико-фармацевтических предприятиях более эффективные методы. Однако эф-

фekt внедрения прогрессивных методов сушки может быть различен, особенно с точки зрения перспективности и дальнейшей реализации выбранного метода [23].

В настоящее время разработаны рациональные условия технико-экономического проектирования сушильных установок, предусматривающие непрерывность процесса; увеличение агрегатных мощностей; совмещение в одном аппарате процесса сушки с другими технологическими процессами; применение интенсивных комбинированных способов сушки, дающих наибольший эффект для данного высушиваемого материала; механизацию и автоматизацию процессов [2].

Из этих положений следует выделять основные факторы, определяющие наибольшую перспективность и эффективность, характерные для рассматриваемой отрасли промышленности.

При выборе метода необходимо учитывать особенности материала как объекта сушки и требования, предъявляемые к готовому продукту.

Все химико-фармацевтические материалы, нуждающиеся в сушке, можно разделить на кристаллические, таблетлируемые (кристаллоколлоидные) и пастообразные.

Метод сушки может считаться наиболее перспективным, когда один тип аппарата используется для широкой номенклатуры препаратов. Это возможно в том случае, если аппарат осуществляет комбинированную замену необходимых узлов, способных обеспечить условия подачи, гранулирования и другие процессы для материалов различной консистенции и производить органическую увязку технологических процессов до и после сушки и высокоинтенсивные условия тепло- и массообмена. Рациональный технологический режим сушки для целого ряда препаратов может быть создан при обеспечении гибкой регулировки сушки и сопутствующих (гранулирование, измельчение и др.) процессов; сочетания процессов перемешивания, грануляции и сушки; минимальных потерь материала на всех стадиях процесса.

Процесс сушки прежде всего зависит от комплекса характерных свойств материала, которые определяют его как объект сушки. Эти свойства для таблеточного производства в значительной степени зависят от рационального приготовления таблеточной массы, например,

вязкость массы определяется фракционным составом, формой кристаллов исходного лекарственного препарата, процентным содержанием связующего, его консистенцией. Химическая природа взятых компонентов, как правило, не может быть изменена в результате применения технологических процессов в отличие от свойств материала как объекта сушки, которые формируются при оптимальных условиях (время, температура и интенсивность) влажного смешения, в результате чего образуется хорошо формирующаяся, но рыхлая масса.

Интенсивность удаления влаги определяется энергией связи ее с материалом, которая зависит от процесса перемешивания и грануляции, т. е. от приготовления этих масс. Условия процесса смешения кристаллической массы определяют в данном случае форму энергии связи влаги с материалом. Поэтому при заданных условиях можно получить материал, сохнувший до равновесной влажности как в период постоянной скорости, так и в два периода. Таким образом, следует рассматривать процессы технологии приготовления и сушки органически связанными.

Снижение потерь материала до минимума в данном случае необходимо из-за его токсичности и дороговизны.

Перечисленные условия могут быть выполнены при реализации различных методов. Однако наиболее перспективными считаются непрерывные методы сушки. Это на первый взгляд может показаться спорным, так как данное производство малотоннажно и в определенной степени уникально. Но этот вывод не может считаться веским, так как только непрерывные методы способны создать условия для интенсивной, тонкой регулировки и органической увязки процессов смешения, сушки, грануляции и автоматизации всего производства.

Кроме того, непрерывные методы сушки позволяют осуществлять процесс при минимальном времени пребывания материала в реакционной зоне (2—5 мин и менее), а значит, снизить до минимума время соприкосновения исходного материала с влагой и воздухом при достаточно высоких температурах.

Периодические процессы из-за жесткой связи экономических показателей аппарата и условий работы со временем пребывания материала в аппарате не позволя-

ют резко
непрерыв
Основ
эффектив
ской увяз
спудрива
ская связ
лучаемого
ственного
протяжен
Иногда
времени
ственное в
тивность. I
стера, вод
ствующего
при повыш
ся и длите
рата с возд
гим процес
В результа
влажного
таблеточны
эффективн
чества.
Таким о
ляясь осно
ным критер
рациональн
и их сочета
точных фор
полную мех
лекарствен
риалами. К
стве синтез
ют организ
регулирован
заранее зад
В заклю
метода в ме
ляться возм
жимов суши
качество в
2. Зак. 312

ют резко снизить это время (20—40 мин). Применение непрерывнодействующих аппаратов наиболее выгодно.

Основным фактором, определяющим перспективную эффективность метода, является возможность органической увязки процессов грануляции и сушки, сушки и опудривания, сушки и экстракции и т. д., т. е. органическая связь всех процессов, обеспечивающих качество получаемого продукта. Это важно, так как качество лекарственного препарата как объекта сушки формируется на протяжении предыдущих технологических процессов.

Иногда использование периодических, длительных по времени методов сушки приводит к тому, что лекарственное вещество теряет даже фармакологическую активность. Продолжительное действие крахмального клейстера, воды связанной мицеллы снижает активность действующего начала лекарственного препарата особенно при повышенных температурах. Нежелательным является и длительное соприкосновение лекарственного препарата с воздухом, что приводит к окислительным и другим процессам, также изменяющим качество продукции. В результате длительного и бесконтрольного процесса влажного смешения и гранулирования получают такие таблеточные массы, которые при самом интенсивном и эффективном методе сушки дают препарат низкого качества.

Таким образом, качество получаемого препарата, являясь основным показателем, а следовательно, и основным критерием метода, может быть повышено за счет рациональной технологии. Непрерывные методы сушки и их сочетание со всей технологией приготовления таблеточных форм обеспечивают герметичность процессов и полную механизацию, что необходимо, так как почти все лекарственные препараты являются токсичными материалами. Кроме того, непрерывные методы в производстве синтетических лекарственных препаратов позволяют организовать непрерывные циклы производства с регулированием технологии и получением материала с заранее заданными свойствами.

В заключение можно отметить, что перспективность метода в медицинской промышленности должна определяться возможностью создания высокоинтенсивных режимов сушки, способных коренным образом улучшить качество выпускаемых медицинских препаратов.

ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИЕ ПРЕПАРАТЫ КАК ОБЪЕКТЫ СУШКИ И ИХ КЛАССИФИКАЦИЯ

2.1. СТРУКТУРА И КЛАССИФИКАЦИЯ ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

В настоящее время выпускается широкий ассортимент лекарственных и витаминных препаратов, номенклатура которых постоянно расширяется. Создаются новые вещества, требующие обследования и определения их принадлежности к тому или иному классу материалов.

До настоящего времени в химико-фармацевтической промышленности нет классификации используемых материалов, однако она необходима, так как процессы тепло- и массообмена могут быть наиболее эффективны, если известны характеристики материалов, определяющие эти процессы, например сушку.

Как уже отмечалось, сушка является сложным технологическим процессом, который должен не только обеспечить удаление жидкой фазы, но и не ухудшить качество продукта, а в ряде случаев и улучшить его. Поэтому при разработке технологии сушки должны учитывать прежде всего свойства материала как объекта сушки, методы и обоснование режимов процесса и только затем создавать конструкцию аппарата [2].

Понятие «объект сушки» включает комплекс характеристик: структурно-механические свойства (фракционный состав, истинный и кажущийся удельные веса, реологические свойства и др.), массообменные и теплофизические характеристики, термолабильность. Особо следует обратить внимание на то, что большинство из них зависит от ряда факторов, обусловленных природой материала, технологией предварительной обработки и подготовки к сушке.

Исследование номенклатуры медицинских препаратов наиболее эффективно при надлежащей группировке, классификации всех материалов по общим, сходным признакам.

Наиболее общим признаком, характерным для большинства медицинских препаратов, является их кристаллическая структура. Поэтому прежде всего необходимо выделить кристаллическую группу материалов: продукты синтетического, витаминного производства и ряд таблетлируемых материалов, грануляция которых происходит с помощью воды.

Как известно, кристаллический характер вещества зависит прежде всего от его собственных свойств и условий, при которых происходит переход в твердое состояние. Основой структуры вещества в твердом состоянии в этом случае является кристалл. На размеры последнего сильно влияют условия кристаллизации, которую проводят обычно из растворов, что сказывается на качестве готового продукта.

Особенность кристаллических веществ — их векториальность, т. е. неоднородность свойств (теплопроводности, скорости растворения, прочности и др.) по разным направлениям [25]. Характерными внешними признаками кристаллических веществ служат определенная температура перехода их в жидкое состояние (температура плавления), геометрическая форма и размер кристаллов того или иного вида [26].

Предварительная обработка кристаллических материалов в производстве медицинских лекарственных препаратов часто связана с грануляцией, поэтому следует выделить вторую группу материалов, к которой относятся все таблеточные массы. Технология их приготовления состоит в том, что кристаллический лекарственный порошок оводняется коллоидными растворами. Эти массы называются кристаллоколлоидными [27].

Третья группа материалов — пастообразные.

Специфические особенности влажных материалов как объектов сушки обуславливаются их природой, структурой, предварительной обработкой.

Главной характеристикой, определяющей тепло- и массообменные процессы, процессы сушки, является связь жидкой фазы (воды) с твердым скелетом материала. Процесс удаления влаги сопровождается разру-

шением этой связи с затратами энергии. Перенос влаги внутри материала также зависит от характера связи между ней и материалом.

В теории сушильных процессов применяют классификацию П. А. Ребиндера, который предложил разделить формы связи влаги по принципу интенсивности энергии связи и выделил среди них три основные группы: химическую, физико-химическую и физико-механическую [1, 2, 28—32].

Химически связанная влага — это вода в точных химических соотношениях, она удерживается наиболее прочно и при обычных сушильных процессах, т. е. при нагревании тела до 120—150 °C не удаляется.

Физико-химическая связь жидкости подразделяется на адсорбционно-связанную и осмотическую.

Адсорбционное поглощение влаги вызывается притяжением молекул водяного пара наружной и внутренней поверхностью микрофибрилл. Процесс связывания жидкости с коллоидным телом аналогичен процессу смешивания двух жидкостей с разными молекулярными весами. При поглощении жидкости происходит сжатие (контракция) системы коллоидное тело — жидкость и выделение тепла. Объем набухшего тела меньше суммы объема тела и поглощенной им влаги. Благодаря этому адсорбционная влага находится в сжатом состоянии и обладает рядом специфических свойств.

Под адсорбционно-связанной жидкостью следует понимать не только жидкость, адсорбированную на внешней поверхности коллоидных частиц (мицелл), но и на внутренних поверхностях мицеллы [1, 28].

Избирательная диффузия и осмотическое поглощение влаги характерны для коллоидных тел. Они обуславливаются наличием в теле фракций различного молекулярного веса, которые обладают разной степенью растворимости. Поглощаемая осмотически жидкость по своим свойствам не отличается от обычной. К осмотически поглощенной относится и жидкость, находящаяся внутри клетки, захваченная при образовании коллоидного тела, т. е. иммобилизованная [1]. Непосредственной движущей силой осмотического проникновения жидкости является разность осмотических давлений растворимой фракции.

Физико-механически связанная жидкость — это жид-

кость, которая находится в капиллярах, и жидкость смачивания.

Капиллярная связь влаги определяется наличием поверхностного натяжения и капиллярного давления над поверхностью мениска. В капиллярах гидрофильных тел образуется вогнутый мениск, давление пара над которым всегда ниже, чем над плоской водной поверхностью, и определяется по формуле Томсона

$$\varphi = \frac{P_r}{P_n} = e^{-\frac{2\sigma\rho_{\text{п}}}{P_n\rho_{\text{ж}}r}}, \quad (1)$$

где φ — относительная упругость пара; P_r , P_n — давление насыщенного пара над поверхностью мениска жидкости и над свободной поверхностью; σ — поверхностное натяжение; r — радиус капилляра; $\rho_{\text{п}}$, $\rho_{\text{ж}}$ — соответственно плотность пара и жидкости.

Как видно из выражения (1), при радиусе капилляра 10^{-5} см давления над поверхностью мениска и свободной плоской поверхностью практически равны. Это дало возможность А. В. Лыкову разделить все капилляры в капиллярно-пористых телах на микрокапилляры ($r < 10^{-5}$ см) и макрокапилляры ($r > 10^{-5}$ см). Основная причина деления капилляров на микро- и макрокапилляры обусловлена разными механизмами переноса газообразного вещества в этих капиллярах. В микрокапиллярах происходит капиллярная конденсация, так как пар, ненасыщенный в обычных условиях, оказывается пересыщенным для капилляров, имеющих $r < 10^{-5}$ см.

К физико-механической связи влаги относится также влага смачивания, основной силой присоединения которой будет поверхностное натяжение, проявляющееся при непосредственном соприкосновении с телом.

Особое значение в определении объекта сушки имеют реологические свойства продукта. Эти характеристики определяют процессы грануляции, сушки и последующей обработки всех таблеточных материалов. Процесс приготовления таблеточной массы состоит из следующих операций: взвешивания исходного кристаллического препарата (лекарственного или витаминного); приготовления крахмального клейстера; смешивания коллоидного раствора с кристаллическим препаратом; влажного гранулирования.

Как правило, влажное перемешивание длится не менее 15 мин. Исследуемые дисперсные системы независимо от их химического строения, структурной принадлежности имеют один общий существенно важный признак — они по природе своей гетерогенны, т. е. характеризуются наличием поверхности раздела между различными образующими их дисперсными фазами (твердой, жидкой и газообразной) [31—34].

Дисперсные системы с твердыми фазами могут быть разделены на три группы [31]: двухфазные типа твердая дисперсная фаза — газовая дисперсионная среда (Т—Г); двухфазные типа твердая дисперсная фаза — жидкая дисперсионная среда (Т—Ж); трехфазные типа твердая дисперсная фаза — жидкая и газовая дисперсионные среды (Т—Ж—Г).

Влажные кристаллические и таблеточные массы относятся к третьей группе.

Технологический процесс смешивания твердой дисперсной фазы с жидкой (связующим) включает в первую очередь процессы массопереноса (массопередачи) дисперсных фаз. В данном случае этот процесс является определяющим в формировании структуры материала. В этих массах имеет место гетерогенность (наличие развитой межфазной поверхности), а значит, основные условия однородности, пути оптимизации и управления этими процессами определяются сочетанием двух факторов: увеличения поверхности раздела фаз S при обеспечении высокой объемной концентрации твердой фазы f и возрастания скорости массообмена между фазами до достижения максимальной однородности распределения фаз. Однако реализация дисперсных систем в комплексе невозможна, так как условия и закономерности протекания массообменных процессов по мере перехода от грубодисперсных систем к высококонцентрированным микрогетерогенным системам, в которых решающую роль приобретают поверхностные явления на межфазной границе и силы сцепления между частицами, претерпевают качественные изменения. Увеличение концентрации и дисперсности твердых фаз в жидких и газовых дисперсионных средах соответственно приводит к возрастанию величины активной межфазной поверхности, а вместе с тем и к росту свободной поверхностной энергии на границе раздела фаз и увеличению роли мо-

лекулярных
тате проявл
самопроизв
странствен
основных т
стицами т
[31, 32]: 1)
высокодисп
10⁻⁴ дин; 2)
щимися ме
прослойкам
этих просло
верхностной
≈ 10⁻⁴—10⁻⁹
выми контак
ния прослой
полимериза
ных фазовы

Особенно
полная обра
рушения пр
не свойстве
вание в дис
периодов, п
данием стр
ми 1-го ил
структуры
обратно р
Таким обра
алов, ее од
структурооб
интенсивны
[31—33]. Э
тур с обрат
отношение
разрушенн
пени разру
шенных кон
объема сист
частиц твер
(микрогеом
В рассм
ческого ма

лекулярных сил сцепления между частицами. В результате проявления молекулярных сил между частицами самопроизвольно возникают агрегаты из частиц и пространственные трехмерные структуры. Существует три основных типа структур по виду контактов между частицами твердых фаз, которые отличаются прочностью [31, 32]: 1) с точечными контактами, образующимися в высокодисперсных порошках, и прочностью $F \sim 10^{-2} - 10^{-4}$ дин; 2) с коагуляционными контактами, образующимися между частицами твердых фаз, разделенными прослойками жидкой дисперсионной среды, толщина этих прослоек соответствует минимуму свободной поверхностной энергии, а прочность сцепления частиц $F \simeq 10^{-4} - 10^{-9}$ дин; 3) конденсационные с истинными фазовыми контактами, которые образуются после отверждения прослойки между частицами твердых фаз вследствие полимеризации или кристаллизации. Прочность истинных фазовых контактов превышает 0,1 дин [31, 32].

Особенностью структур 1-го и 2-го типов является полная обратимость, они восстанавливаются после разрушения практически до первоначального состояния, что не свойственно структурам 3-го типа. Структурообразование в дисперсных материалах протекает в несколько периодов, причем начальный характеризуется преобладанием структур с обратимыми по прочности контактами 1-го или 2-го типа, а окончательно формирование структуры завершается спонтанным возникновением необратимо разрушающихся истинных фазовых контактов. Таким образом, основы структуры дисперсных материалов, ее однородность образуются в начальный период структурообразования, который по времени совпадает с интенсивными массообменными процессами смешения [31—33]. Это позволяет получить такие свойства структур с обратимыми по прочности контактами, когда соотношение между числом и прочностью эффективных и разрушенных контактов становится оптимальным. Степени разрушения структуры соответствует доля разрушенных контактов от общего числа контактов в единице объема системы, которые определяются концентрацией частиц твердой фазы f , их дисперсностью S и формой (микрогеометрией) структуры [33].

В рассматриваемом случае дисперсность кристаллического материала, количество добавляемого связую-

щего раствора и время формируют особенность структуры, которая характеризуется совокупностью следующих структурно-механических свойств: предельным напряжением сдвига, при котором начинается разрушение структуры P_r , эффективной вязкостью η , модулем упругости E и временем релаксации напряжений Θ .

Эти структурно-механические (реологические) свойства определяют «доброкачественность» полученной массы, так как вязкость η , модуль упругости E , период релаксации Θ резко зависят от скорости деформации $\epsilon = \frac{d\epsilon}{dt}$ или скорости изменения объема системы $V = \frac{dV}{dt}$,

т. е. от степени разрушения структуры. Диапазон изменения этих характеристик в зависимости от ϵ или V тем больше, чем выше дисперсность твердой фазы S и ее концентрация в дисперсионной среде f [31—34]. Следовательно, изменяя скорость деформации при внешних механических воздействиях различной интенсивности, можно в самых широких диапазонах управлять реологическими свойствами высококонцентрированных дисперсных систем, к которым относится большинство химико-фармацевтических препаратов.

Формирование реологических свойств, т. е. процесс структурообразования, определяет энергию связи влаги с материалом. Например, длительное перемешивание дисперсного материала со связующим веществом приводит к образованию плотной коллоидной пленки на кристаллах исходного материала, причем, кроме структурной, появляется адсорбционно-связанная, более интенсивная связь. Следовательно, процесс формирования таблеточной массы определяет ход процесса сушки. Оптимальный режим перемешивания позволяет получить массы, способные «отдавать» жидкость быстро, по линейному закону, когда энергия связи влаги с материалом является влагой смачивания и внутридиффузионные процессы не наблюдаются. По предложенной классификации таблеточные массы относятся к кристаллоколлоидным материалам.

К настоящему времени работ, посвященных исследованию медицинских препаратов как объектов сушки, мало [35—46]. В большинстве из них исследовались структурно-механические характеристики (фракционный

состав, сыпучесть, плотность) и их влияние на качество таблеток, получаемых из порошков и гранулятов [35—42]. Вопросы изучения форм связи влаги с материалом, теплофизических и реологических характеристик представлены в них совершенно недостаточно и касаются довольно малого количества химико-фармацевтических препаратов. Поэтому необходимы дальнейшие широкие исследования в этой области.

2.2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОРБЦИОННО-ДЕСОРБЦИОННЫХ, РЕОЛОГИЧЕСКИХ, ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ ПРЕПАРАТОВ

Методы исследования статики сушки. Статика сушки выясняет поведение различных материалов при взаимодействии их с влажной средой.

Как было отмечено выше, свойства влажных материалов в значительной степени определяются формой связи влаги с материалом и ее величиной.

П. А. Ребиндер, используя основные термодинамические соотношения, приводит количественную характеристику энергии связи влаги с материалом и в качестве единственного критерия принимает величину свободной энергии изотермического обезвоживания. За счет связывания воды с материалом снижается давление пара воды над его поверхностью, поэтому свободная энергия соответственно уменьшается.

Уменьшение свободной энергии ΔF при постоянной температуре T или энергию связи, выраженную работой L , которую необходимо затратить для отрыва 1 моля воды от материала, можно определить по формуле

$$-\Delta F = L = RT \ln \frac{P_n}{P_u} = -RT \ln \varphi, \quad (2)$$

где R — газовая постоянная; P_n — давление насыщенного пара свободной воды; P_u — парциальное давление равновесного пара воды над материалом с влагосодержанием и в любой среде (воздухе, инертном газе или вакууме). Чем прочнее связана вода с материалом, тем меньше величина P_u , и, наоборот, для свободной воды P_u достигает значения P_n , $\varphi=1$ и энергия связи $L = -RT \ln 1 = 0$. При обезвоживании материала величина

L , отнесенная к 1 молю воды, постепенно возрастает, так как с уменьшением влажности материала увеличивается доля удаляемой адсорбционно-связанной влаги. Когда начинает удаляться химическая влага, L повышается.

Тепловой эффект связывания воды: $Q = Q_{\text{и}} - Q_{\text{н}}$ или $\Delta r = r_{\text{и}} - r$, где $Q_{\text{и}}$ — теплота испарения воды, связанной с материалом определенной влажности ($r_{\text{и}}$); $Q_{\text{н}}$ — теплота испарения свободной воды (r).

При выборе режима сушки прежде всего необходимо выяснить, какие формы влаги преобладают в этом материале, а также определить количество жидкости заданной формы связи.

Однако, как указывает А. В. Лыков, между отдельными формами связи влаги с материалом практически трудно провести резкую границу, поэтому любой из предложенных методов определения видов связи влаги с твердым скелетом тела не дает необходимых количественных данных. Наиболее распространенным методом изучения форм связи влаги с материалом и оценки энергии этой связи является экспериментальное определение изменения равновесной влажности материала в зависимости от степени насыщения окружающего воздуха парами воды (относительной влажности воздуха ϕ) и температуры окружающей среды.

Кроме термодинамических параметров, на равновесную влажность влияет направление процесса, в котором достигается равновесие (увлажнение—сорбция или обезвоживание — десорбция). Равновесные параметры системы связаны функциональной зависимостью $f(P, u, T) = 0$, известной как термическое уравнение сорбции [47].

Зависимость между влажностью материала u и влажностью воздуха ϕ при постоянной температуре называют изотермой сорбции и десорбции и записывают уравнением: $u = f(P)_T$. Зависимость u от температуры при постоянной степени насыщения газовой среды имеет вид $u = f(T)_\phi$.

В результате исследования изотерм сорбции и десорбции можно определить энергию связи влаги с материалом в гигроскопической области, ее интенсивность и затраты тепла на испарение связанной влаги; термодинамические параметры тепломассопереноса (истинную удельную изотермическую массоемкость, температурный

коэффициент и термоградиентный коэффициент массопереноса); оценить потенциальные возможности воздуха как сушильного агента; установить оптимальные режимы хранения материала; рассчитать размеры и характер распределения микропор в капиллярно-пористых телах; получить относительный коэффициент сушки, т. е. зависимость между статикой и кинетикой сушки. Учитывая, что на равновесную влажность влияют такие факторы, как структура продукта, условия взаимодействия их с окружающей средой, форма связи влаги с материалом, вывести теоретически уравнение изотермы невозможно.

Экспериментальные методы исследования гигроскопических свойств материала можно разделить на несколько групп: гравиметрические, волюметрические и методы, использующие какие-либо свойства материала, например удельное электрическое сопротивление.

Методы, основанные на измерении электрических свойств, не точны и не применяются для исследования статики сушки химико-фармацевтических препаратов.

В отличие от электрических гравиметрические и волюметрические методы являются прямыми и, следовательно, наиболее точными.

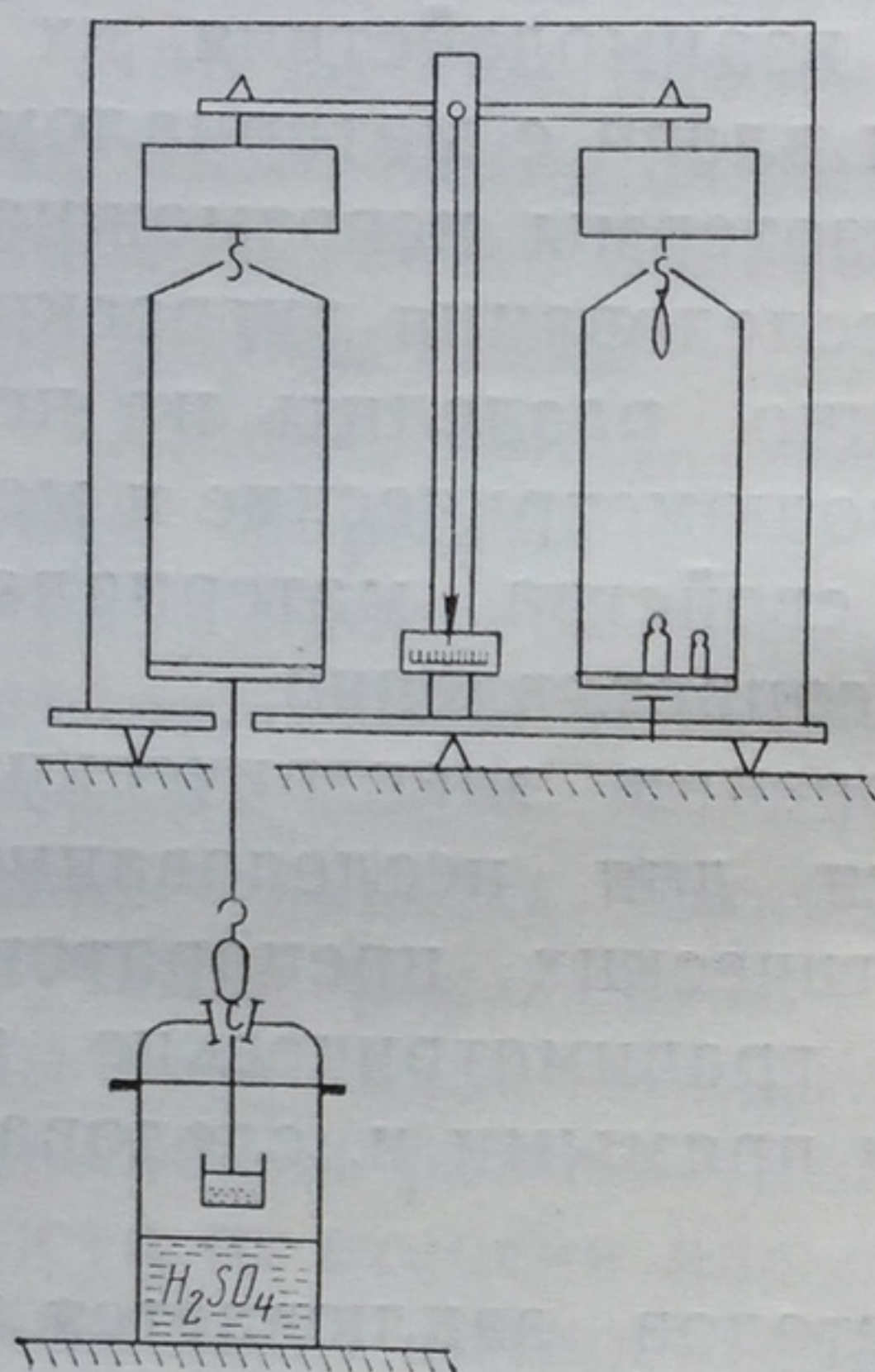
Сущность волюметрических методов заключается в том, что при известном объеме системы, куда помещен исследуемый материал, убыль или прибыль веса можно получить, изменив давление в системе. При известном точном объеме системы можно рассчитать количество воды, поглощенной материалом [48].

Волюметрические методы используются при определении сорбционных свойств в вакууме, однако недостатком их является учет сорбции водяных паров внутренними стенками системы. Эта величина существенно зависит от температуры и изменяется от опыта к опыту. Учитывая особенности волюметрических методов и свойства химико-фармацевтических препаратов, данные методы в исследовании нами не использовались.

Гравиметрические методы наиболее точны и относительно просты. Они позволяют производить кинетические измерения, т. е. измерять скорость увлажнения или сушки исследуемых материалов в зависимости от условий сорбции (десорбции).

К гравиметрическим методам относится тензометрический [29].

Для проведения экспериментов по данному методу были изготовлены специальные сосуды (рис. 8) цилиндрической формы диаметром 70—80 мм и высотой 150—170 мм, закрытые крышками с притертыми пробками, снабженными двумя крючками. Образцы исследуемого материала засыпались в стеклянную чашечку, которая подвешивалась к крючку пробки. В сосуд заливался



раствор серной кислоты определенной концентрации. Образцы взвешивались на весах АДВ-200, приспособленных для данного метода, с точностью 10^{-4} . Схема взвешивания образца показана на рис. 8. К левому рычагу аналитических весов прикреплялась тонкая стальная нить, пропущенная

Рис. 8. Схема аппаратуры для определения гигроскопических свойств химических препаратов тензометрическим методом

через основания весов. Притертая пробка крышки со стаканчиком несколько приподнималась и подвешивалась к нити весов. Как показала проверка, кратковременная разгерметизация (40—50 с) сосуда в процессе взвешивания не оказывала заметного влияния на результаты эксперимента.

Периодическое взвешивание образцов исследуемых материалов производилось в начале опыта через 3, 5, 8 ч, затем — ежедневно и через 3, 7, 10 сут в зависимости от интенсивности убыли веса. Опыт считался законченным при трехкратном повторении одинакового веса образца. Для обеспечения изотермических условий опыта сосуды выдерживались в термостатах, оборудованных системой автоматического поддержания температуры с точностью $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Наряду с простотой тензометрический метод отличается длительностью, что является его недостатком. Кроме того, многие медицинские препараты неиндиффе-

рентны к парам растворов солей и кислот, создающих относительную влажность воздуха.

Этих недостатков лишен динамический метод, предложенный Г. К. Филоненко [49]. На основании данного метода построена универсальная установка для получения изотерм сорбции и десорбции в широком диапазоне изменения влажности. Установка выполнена из девяти

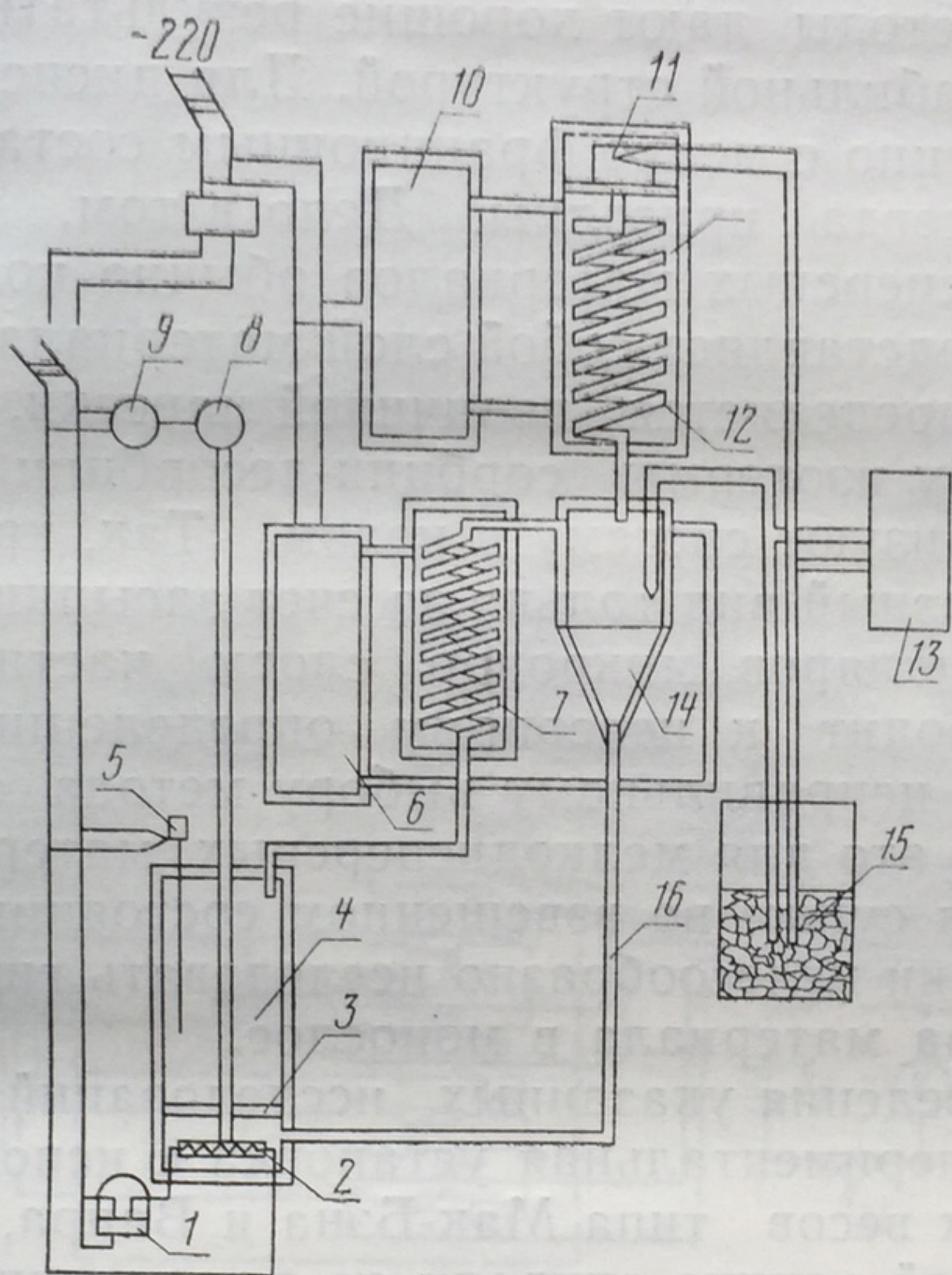


Рис. 9. Схема канала динамической установки: 1 — реле; 2 — электронагреватель; 3 — сетка; 4 — барбатор; 5 — контактный термометр; 6, 10 — термостат; 7 — конденсатор; 8 — ресивер; 9 — вентилятор; 11 — бюкс; 12 — теплообменник; 13 — потенциометр; 14 — циклон; 15 — сосуд Дьюара; 16 — трубопровод

параллельно работающих каналов, в каждом из которых выдерживается заданный температурный режим и определенная влажность воздуха. Это позволяет проводить опыт одновременно на девяти режимах и, следовательно, получать полную изотерму сорбции и десорбции из одного опыта. Установка обеспечивает работу в режимах 287—367 К и относительной влажности 10—100% при скорости воздуха в рабочем канале до 5 м/с. Длительность опытов составляет 5—10 ч. Схема одного канала установки представлена на рис. 9 [50].

По данным А. И. Чуприна, общая погрешность при замере температур составляла $0,1^{\circ}\text{C}$. Изменение веса исследуемых препаратов производилось с точностью, обычной для тензометрического метода. Тензометрический и динамический методы широко использовались нами для исследования гигроскопических свойств медицинских препаратов. Однако необходимо отметить, что указанные методы дают хорошие результаты для материалов со стабильной структурой. Для дисперсных материалов, особенно с мелко фракционным составом, данные методы не всегда пригодны. Дело в том, что навеска образцов дисперсных материалов обычно колеблется от 1 до 5 г и представляет собой слой материала. Структура этого слоя определяется величиной навески, ее уплотнением, поэтому изотермы сорбции-десорбции в этом случае характеризуют систему в целом. Так, кривые могут иметь S-образный вид только за счет засыпки, т. е. образования капилляров, микропор слоем частиц N толщины, что приводит к неверному определению природы материала и неправильному выбору метода сушки. Особенно важно это для мелкодисперсных материалов, подвергающихся сушке во взвешенном состоянии. Для этих методов сушки целесообразно исследовать гигроскопические свойства материала в монослое.

Для проведения указанных исследований нами была создана экспериментальная установка с использованием сорбционных весов типа Мак-Бэна и Вапра, представляющих собой тонкие спирали из распыленного кварца [51]. Основной частью установки являются сорбционные цилиндры с пришлифованными съемными крышками. К крышкам прикреплены сорбционные весы, на конце которых имеются миниатюрные подложки для образцов. На дно сорбционного сосуда наливался раствор серной кислоты. Количество сорбированной влаги регистрировалось по растяжению кварцевой спирали с помощью катетометра КМ-6 с точностью до 1 мм. Растяжение спирали соответствовало изменению веса опытного образца. Чувствительность сорбционных весов определялась длиной пружины, диаметром витка и толщиной спирали. В наших опытах применялись весы чувствительностью от 0,4 до 3 мг/мм, таким образом, взвешивание образцов осуществлялось с точностью до 10^{-5} — 10^{-6} , или до 0,02—0,001%.

Изотермы установившегося веса при растяжении с промежуточными

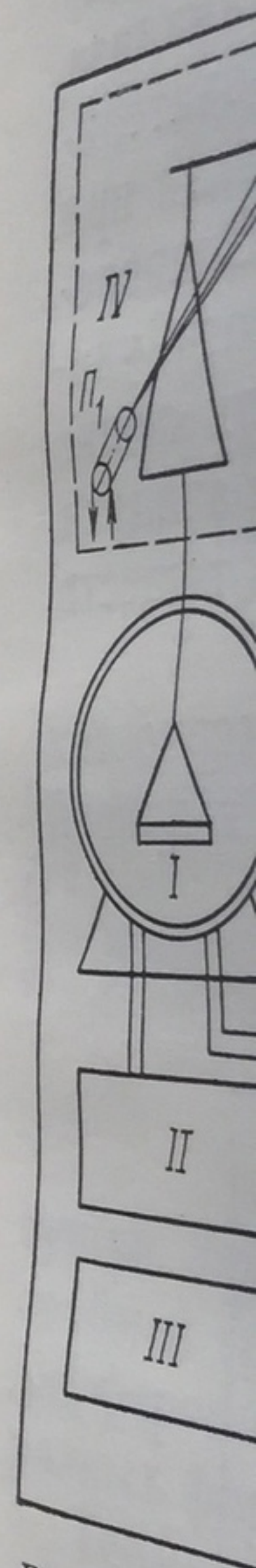


Рис. 10. Прибор для измерения энергии сорбции

ность пружины растяжения. Записывается график. Затем крышка сорбционных весов, к которой прикреплен исследуемый образец, помещается в равновесие с окружающей средой. При этом катетометр последовательно

Изотермы сорбции и десорбции на рассмотренной установке определялись по следующей методике. До начала опыта с помощью катетометра и платиновых разновесок производилась тщательная калибровка сорбционных весов с подложками. При этом кварцевые спирали растягивались во всем рабочем диапазоне взвешивания с промежутками через 10 мг. Определялась чувствитель-

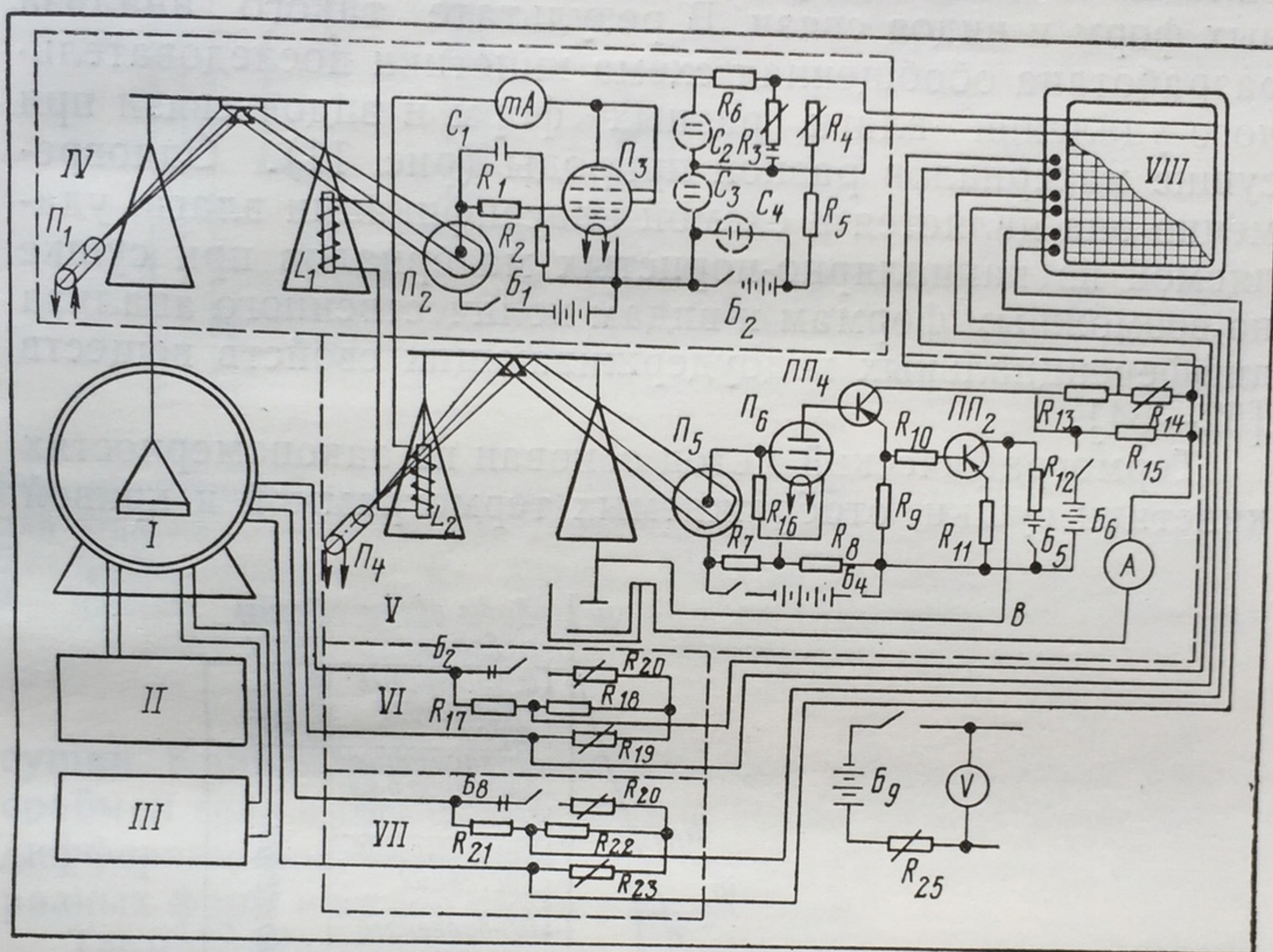


Рис. 10. Принципиальная схема лабораторной установки для определения энергии связи влаги с материалом по методу Казанского

ность пружины или в случае нелинейной зависимости растяжения пружины от навески строился тарировочный график. Затем укладывались образцы на подложку весов, крышка сверху закрывалась и фиксировалось растяжение спирали, вызванное сорбционными процессами исследуемого материала. Установление гигротермического равновесия, соответствующего определенному ϕ и температуре опыта, отмечалось постоянными отсчетами по катетометру.

При исследовании процесса сушки необходимо знать последовательность удаления влаги разных форм и ви-

дов связи. Поэтому наибольший интерес представляет термографический метод анализа видов связи влаги с материалом, предложенный М. Ф. Казанским (рис. 10). Метод основан на исследовании кинетики сушки тонких образцов капиллярно-пористых тел путем совместного анализа кинетических кривых, характеризующих внутренний и внешний тепло- и массообмен, и водоудерживающих свойств материалов по отношению к влаге разных форм и видов связи. В результате такого анализа разработана обобщенная схема кинетики последовательного удаления влаги разных форм и видов связи при сушке материалов разной природы (рис. 11). Одновременно она является и схемой классификации влаги, удаляемой из капиллярно-пористых материалов при сушке по возможным формам и видам количественного анализа дифференциальных водоудерживающих свойств веществ [52—54].

Термографический метод основан на закономерностях кинетики сушки, отображаемых термограммой и кривой

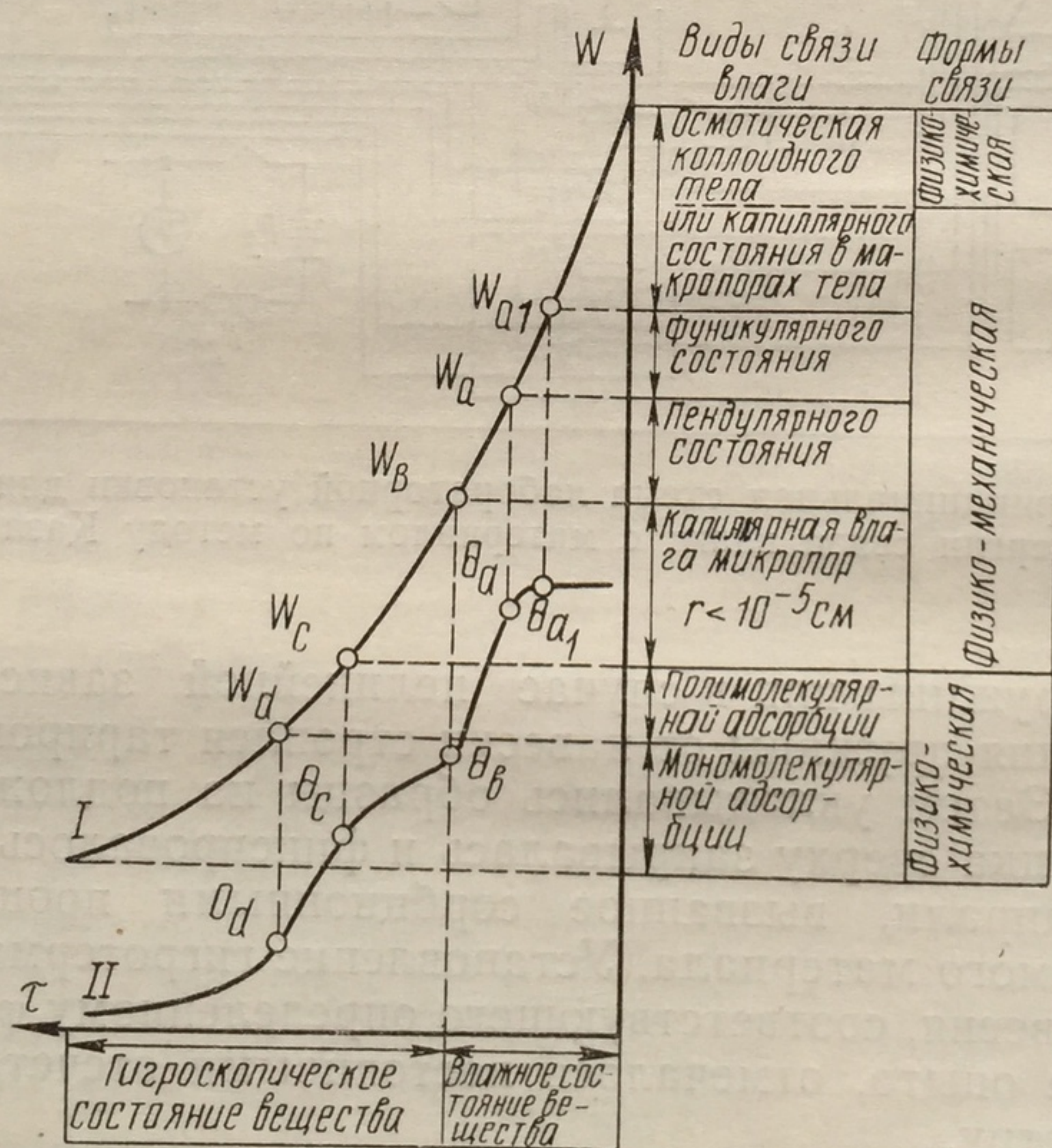


Рис. 11. Термограмма энергии связи влаги с материалом

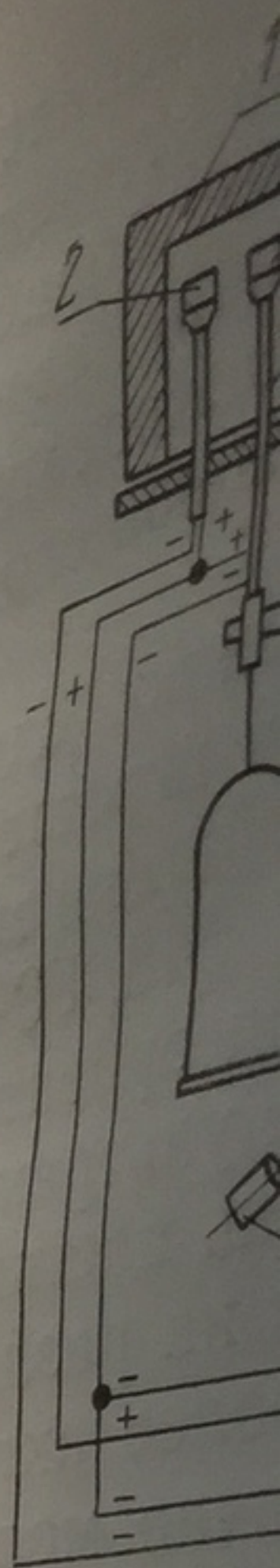


Рис. 12. Дериватор для эталона; 3 — т...
5 — трубка-держат...
9 — магнит; 10 — з...

сушки. Кривая...
сообщен тела в...
дифференциров...
разных форм и...
Термографич...
дов компактно...
результатам одно...
способность вещест...
связи влаги, ма...
получения вод...
при разной тем...
Рассмотренный...
исследования ф...
препаратов.

Одним из пе...
связи влаги с м...
ский метод [55]
температурного...
Как указыва...
3. Зак. 312

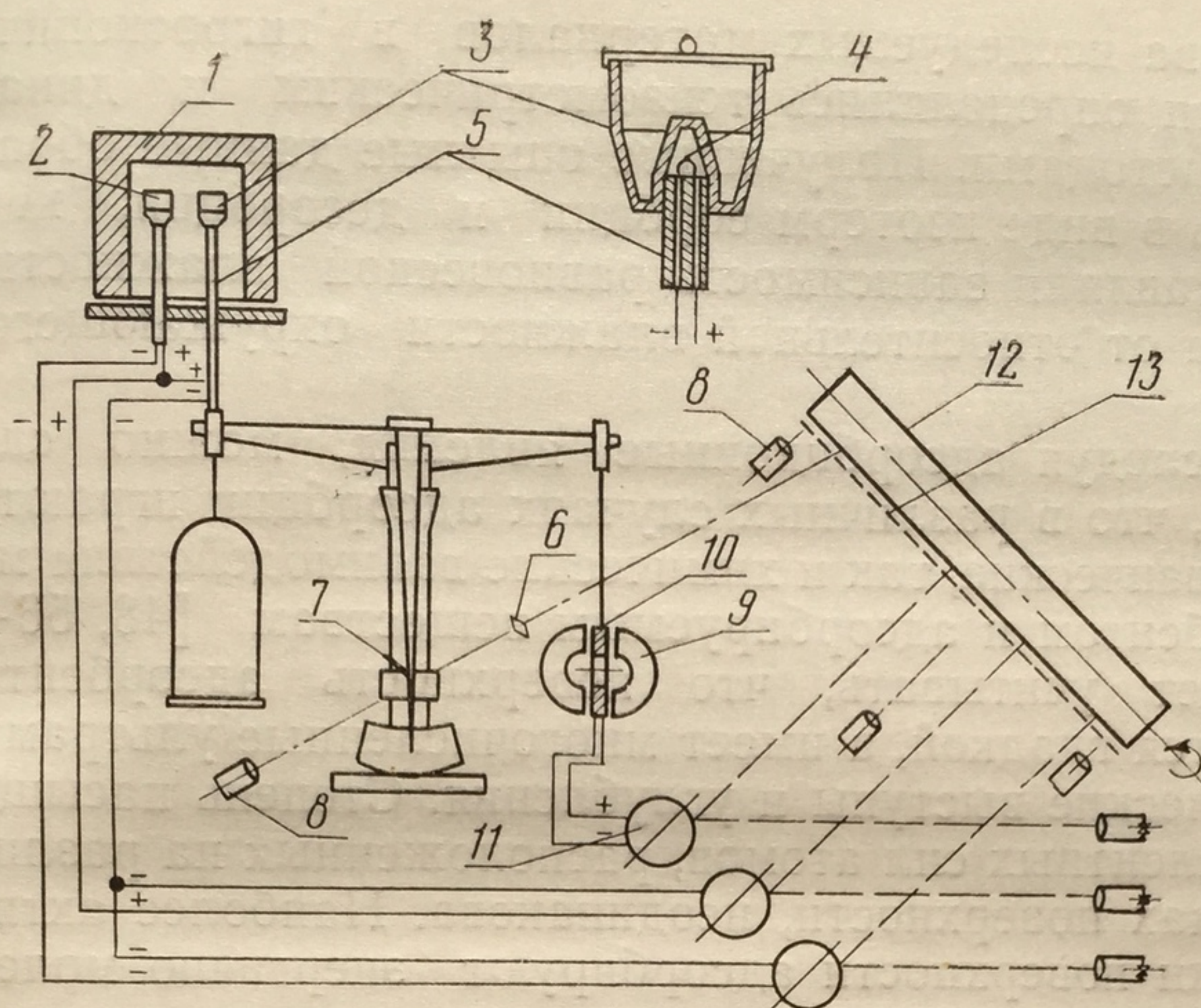


Рис. 12. Дериватограф системы МОМ: 1 — печь нагрева; 2 — тигель для эталона; 3 — тигель для испытуемого материала; 4 — термопара; 5 — трубка-держатель; 6 — линза; 7 — стрелка весов; 8 — лампы; 9 — магнит; 10 — электрокатушка; 11 — гальванометр; 12 — барабан самописца; 13 — фотобумага

сушки. Кривая сушки количественно характеризует массообмен тела в процессе сушки, а термограмма позволяет дифференцировать процесс по периодам удаления влаги разных форм и видов связи с веществом.

Термографический метод отличается от других методов компактностью определения, позволяющей по результатам одного опыта найти водоудерживающую способность вещества по всем возможным формам и видам связи влаги, малой затратой времени, пригодностью для получения водоудерживающей способности вещества при разной температуре, незначительной погрешностью. Рассмотренный метод может быть использован для исследования форм и видов связи влаги медицинских препаратов.

Одним из перспективных методов определения форм связи влаги с материалом является дериватографический метод [55] при условии создания стационарного температурного режима (рис. 12).

Как указывалось выше, сорбционно-десорбционные

свойства исследуемых материалов в гигроскопической области определялись тензометрическим и динамическим методами. Полученные опытные данные обрабатывались в виде изотерм сорбции и десорбции, которые представляли зависимость равновесной влажности парата от относительной влажности окружающего воздуха.

Исследуя адсорбционные явления, можно сделать вывод, что в различных случаях адсорбции играют роль как физические, так и химические взаимодействия между адсорбентом и адсорбируемым веществом [48, 56—59]. Следует учитывать, что поверхность адсорбента не является гладкой, а имеет многочисленные ультрамикроскопические выступы и углубления. Степень насыщенности валентных сил атомов, расположенных на различных участках поверхности, неодинакова. Наиболее активные участки поверхности адсорбируют энергично молекулы данного газа или пара, причем вид газа, его химические свойства имеют главное значение. Такую адсорбцию называют хемосорбцией [58].

Адсорбция обуславливается тремя составляющими межмолекулярного притяжения: дисперсионным, ориентационным и индукционным взаимодействием [47], 56—59].

При физической адсорбции на поверхности ионных кристаллов основную роль играют ориентационные и индукционные взаимодействия [47]. Все вышеуказанное в той или иной степени может относиться к сорбционным явлениям исследуемых препаратов.

Все исследуемые химико-фармацевтические препараты были разделены на три группы: кристаллические, кристаллоколлоидные (смесь кристаллических препаратов со связующим веществом — крахмальный клейстер, желатин, сахарный сироп) и пастообразные.

Необходимо отметить, что большинство химико-фармацевтических препаратов имеют кристаллическую структуру, отличающуюся по фракционному составу (от моно- до полифракционного) размером кристаллов (от 1 мкм — до 1 мм), их формой (игольчатые и пластинчатые, с гладкой и шероховатой поверхностью) и прочностными характеристиками как кристаллических, так и кристаллоколлоидных материалов.

Рассмотрим изотермы сорбции кристаллических препаратов, полученные тензометрическим или динамическим методом. Как видно из рис. 13, разный характер изотерм обусловлен свойствами исследуемых препаратов. По виду изотермы можно разделить на три подгруппы: 1) равновесная влажность которых практически не изменяется в интервале φ 0—0,85, а затем наблюдается увеличение ее; 2) равновесная влажность которых увеличивается с увеличением φ ; 3) типичные для капиллярно-пористых тел.

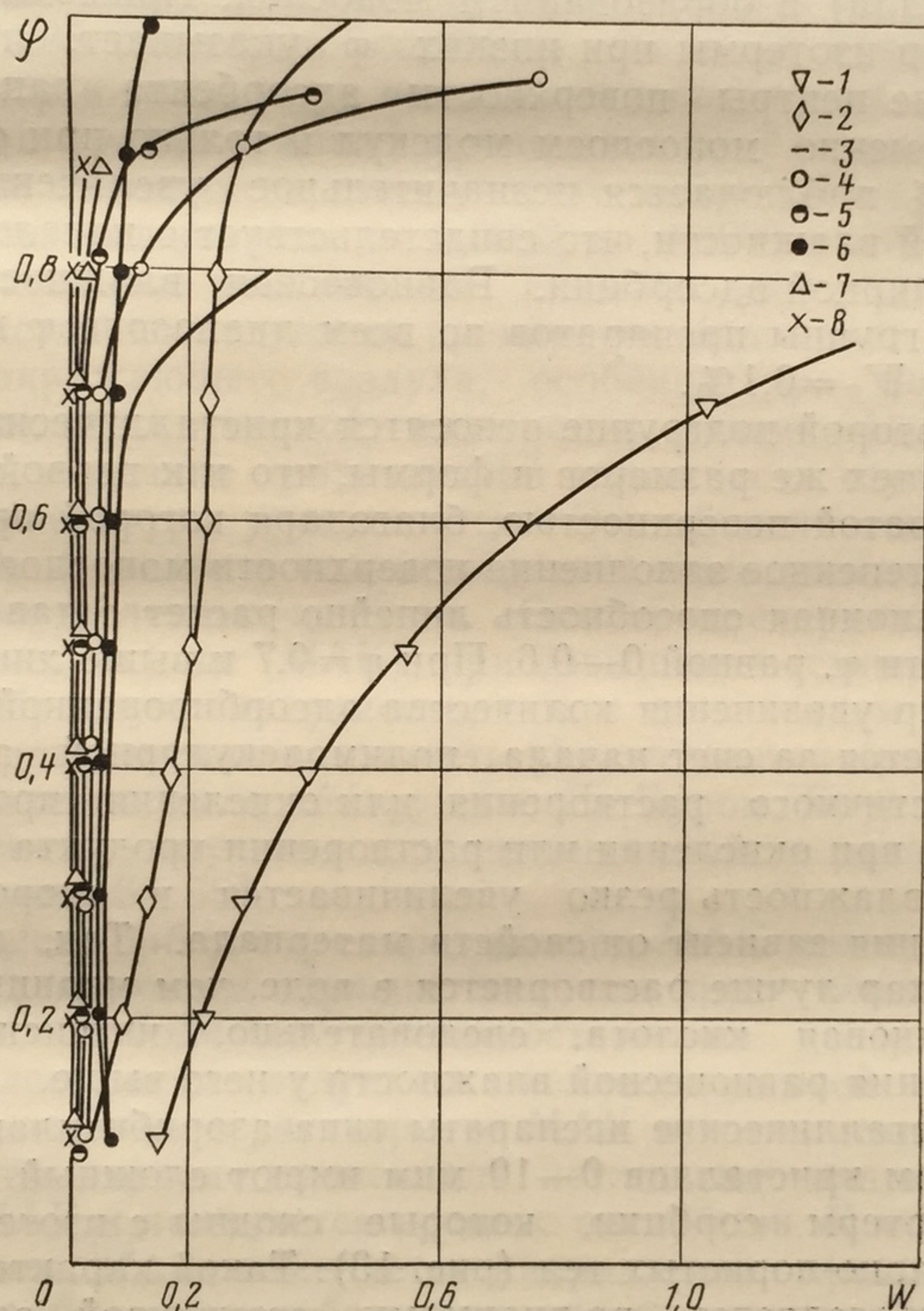


Рис. 13. Изотермы сорбции кристаллических химико-фармацевтических препаратов при $T=293$ К: 1 — кофеин бензоат натрия; 2 — азорибетиламин; 3 — сахарная пудра; 4 — МАК; 5 — сорбоза; 6 — аналгин; 7 — норсульфазол; 8 — амидопирин

Как показал анализ полученных результатов, изотермы первой подгруппы характерны для кристаллических препаратов, размер которых колеблется от 100 мкм и выше, с четко выраженной формой кристаллов типа норсульфазола, анальгина, амидопирин, сорбозы и др. Это вызвано тем, что указанные препараты в слое образуют макропористую структуру. Процесс адсорбции в ней можно представить как результат динамического взаимодействия молекул адсорбтива (в данном случае паров воды) с активными центрами на поверхности материала (кристалла) и образованием монослоя. Прямолинейный характер изотермы при низких ϕ указывает, что все активные центры поверхности адсорбента заполнены одновременно монослоем молекул и только при ϕ выше 75—80% наблюдается незначительное увеличение равновесной влажности, что свидетельствует о начале полимолекулярной адсорбции. Равновесная влажность указанной группы препаратов во всем диапазоне ϕ не превышает $W_p = 0,1\%$.

Ко второй подгруппе относятся кристаллические препараты тех же размеров и формы, что и к первой, но с шероховатой поверхностью, благодаря которой происходит постепенное заполнение поверхности монослоем, т. е. адсорбционная способность линейно растет с давлением в области ϕ , равной 0—0,6. При $\phi = 0,7$ и выше линейный характер увеличения количества адсорбированной влаги нарушается за счет начала полимолекулярной адсорбции, частичного растворения или окисления продукта. Причем при окислении или растворении продукта равновесная влажность резко увеличивается и скорость ее повышения зависит от свойств материала. Так, например, сахар лучше растворяется в воде, чем медицинская аскорбиновая кислота, следовательно, интенсивность увеличения равновесной влажности у него выше.

Кристаллические препараты типа азорибитиламина с размером кристаллов 0—10 мкм имеют сложный характер изотерм сорбции, которые сходны с изотермами капиллярно-пористых тел (рис. 13). Такой характер изотерм определяется, по-видимому, структурой засыпки материала, так как сами кристаллы азорибитиламина, согласно микрофотографиям, не пористые по своей природе и в монослое ведут себя как крупнокристаллические препараты (амидопирин, норсульфазол). В слое же

благод
игольч
микрок
Со
0,45, пр
ности
0,0022
Это, по
увлажн
капилля
кирован
 $\phi = 0,5$ —
внутри
ниях (п
денсаци
чение в
Значи
большин
ратура о
значения
известно,
нием тем
ипом Ле
для мног
воряющи
имеют об
ратуры ра
Такое явл
и другими
материал
Процес
ставить сл
воды со
кристалло
ности крис
де. В этом
вором МАК
начала адс
термы сорб
ной влажно
весной влаж
Известно
ре молекул

благодаря незначительным размерам (0—10 мкм), игольчатой форме эти кристаллы образуют макро- и микрокапилляры, которые и формируют вид изотермы.

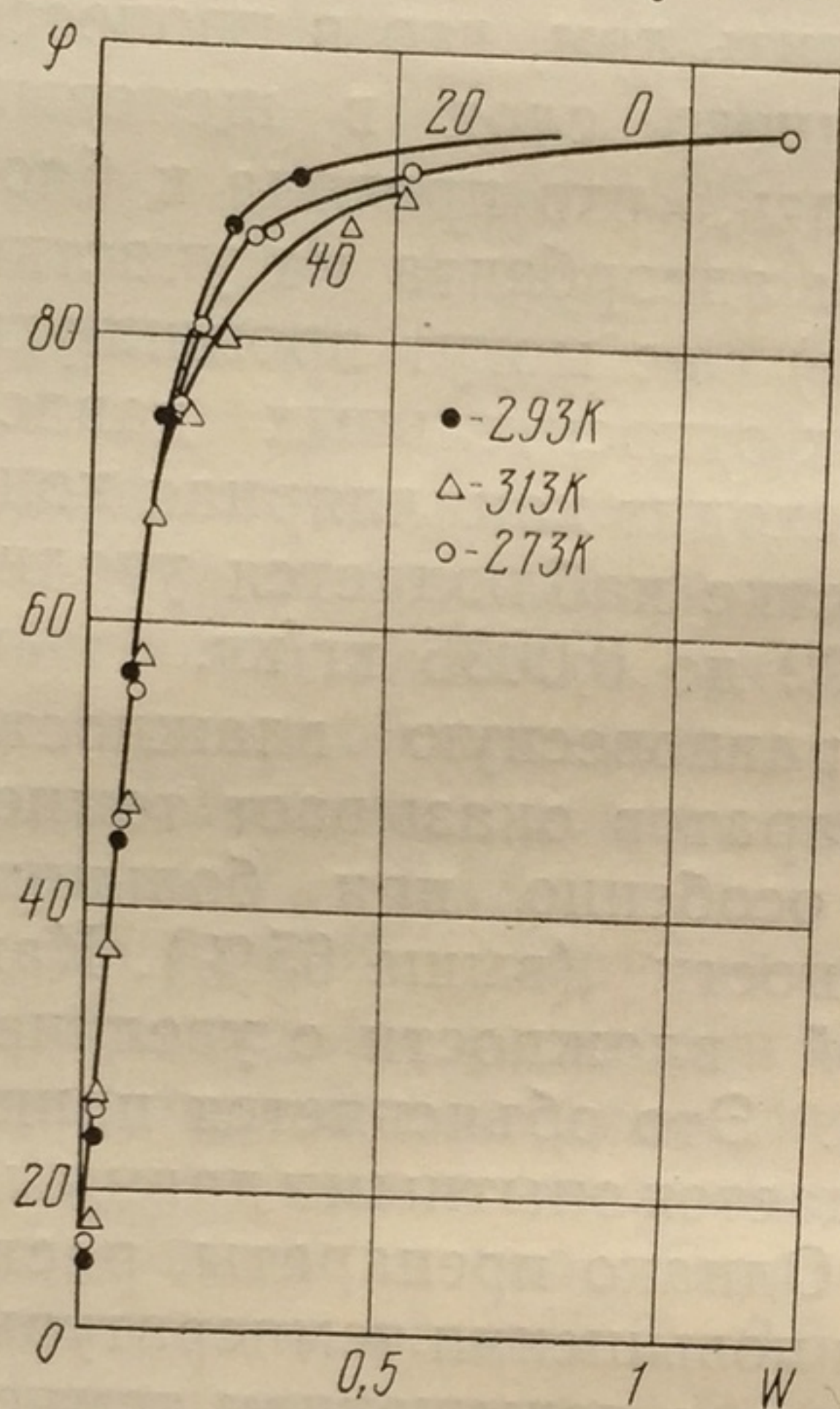
Согласно рис. 13, на участке изотерм φ , равное 0—0,45, происходит адсорбция пара на неровностях поверхности кристаллов. При влагосодержании 0,0015—0,0022 кг/кг кривая круто поднимается вверх до $\varphi=0,85$. Это, по-видимому, можно объяснить тем, что в процессе увлажнения толщина адсорбционного слоя в щелевых капиллярах настолько увеличилась, что привела к блокированию пор, т. е. молекулы адсорбента на участке $\varphi=0,5—0,85$ (изотерма сорбции) не могут проникнуть внутрь пор и только при высоких относительных давлениях (при $\varphi=0,85$ и выше) происходит капиллярная конденсация. Поэтому на этом участке наблюдается увеличение влагосодержания от 0,0022 до 0,0035 кг/кг.

Значительное влияние на равновесную влажность большинства исследуемых препаратов оказывает температура окружающего воздуха, особенно при больших значениях относительной влажности (выше 65%). Как известно, величина равновесной влажности с увеличением температуры уменьшается. Это объясняется принципом Ле-Шателье и подтверждается опытными данными для многочисленных веществ. Однако препараты, растворяющиеся в воде (МАК), при повышении температуры имеют обратную зависимость, т. е. с повышением температуры равновесная влажность увеличивается (рис. 14). Такое явление было обнаружено Де-Буром, Брунауэром и другими при изучении сорбционных свойств различных материалов [56, 58].

Процесс сорбции препаратов типа МАК можно представить следующим образом: вначале идет соединение воды со свободными валентностями на поверхности кристаллов, затем следует ожижение ее по всей поверхности кристалла и растворение МАК в поглощенной воде. В этом периоде происходит поглощение влаги раствором МАК и начинается процесс адсорбции. К моменту начала адсорбции изменяется направление кривой изотермы сорбции при небольшом увеличении относительной влажности окружающего воздуха, величина равновесной влажности материала заметно возрастает.

Известно, что в результате взаимодействия в растворе молекул растворенного вещества и растворителя

испарение последнего затруднено. Поэтому при одной и той же температуре давление пара над раствором меньше давления насыщенного пара над чистым растворителем. Понижение (депрессия) давления пара тем больше, чем выше концентрация раствора, и может быть выражено законом Рауля. При повышении температуры указанное отношение уменьшается, вследствие чего происходит интенсивное поглощение влаги МАК из окружающей среды.



Это объясняется тем, что равновесная влажность препаратов типа МАК, хорошо растворимых в воде, при определенном значении относительной влажности воздуха с повышением температуры выше 20 °C увеличивается.

Рис. 14. Изотермы сорбции кристаллических препаратов (МАК)

Таким образом, процесс сорбции водяных паров препаратами типа МАК происходит комплексным путем: в результате адсорбирования твердым веществом моно- и полимолекулярной влаги и растворения.

Особенностью кристаллических препаратов является то, что в монослое или засыпке с макропористой структурой они практически не образуют гистерезиса или образуют настолько незначительный, что им можно пренебречь.

Мелкокристаллические препараты, которые в слое образуют капиллярно-пористую структуру, имеют сорбционный гистерезис, определяемый структурой засыпки.

Как видно из рис. 15, характер изотерм мелкокристаллических препаратов обусловлен в основном структурой слоя. Отдельные же кристаллы ведут себя как материалы первой и второй подгрупп. Следовательно, для

выявления
необходим
или в мон
зультаты
ческих пр
аппаратов
не рекомен
слоевых м
вий хранен
Таблето
паратови
совершенно
отдают вла
фекта: меж
осмотическ
мала).
Согласн
динения, на
различного
взаимодейст
ции нераств

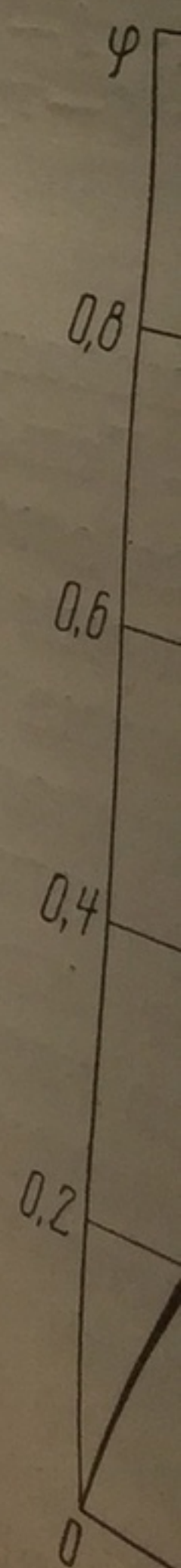


Рис. 15. Изотермы сорбции кристаллических препаратов (МАК)

выявления адсорбционной природы самого вещества необходимо проводить исследования с одним кристаллом или в монослое. Следует отметить, что использовать результаты сорбционных характеристик мелкокристаллических препаратов, полученных слоевым методом для аппаратов с активными гидродинамическими режимами, не рекомендуется. Эти данные можно применять для слоевых методов сушки, а также для определения условий хранения мелкодисперсных материалов.

Таблеточные массы, т. е. смесь кристаллических препаратов и связующих веществ, как объекты сушки почти совершенно не изучены. Эти материалы по-разному отдают влагу, и их свойства зависят от суммарного эффекта: межкристаллической влаги и влаги, поглощенной осмотически сложно построенной мицеллой (гель крахмала).

Согласно данным С. М. Липатова, молекулярные соединения, например крахмал, состоят из смеси фракций различного молекулярного веса, которые по-разному взаимодействуют с водой: высокомолекулярные фракции нерастворимы в воде, а низкомолекулярные — раст-

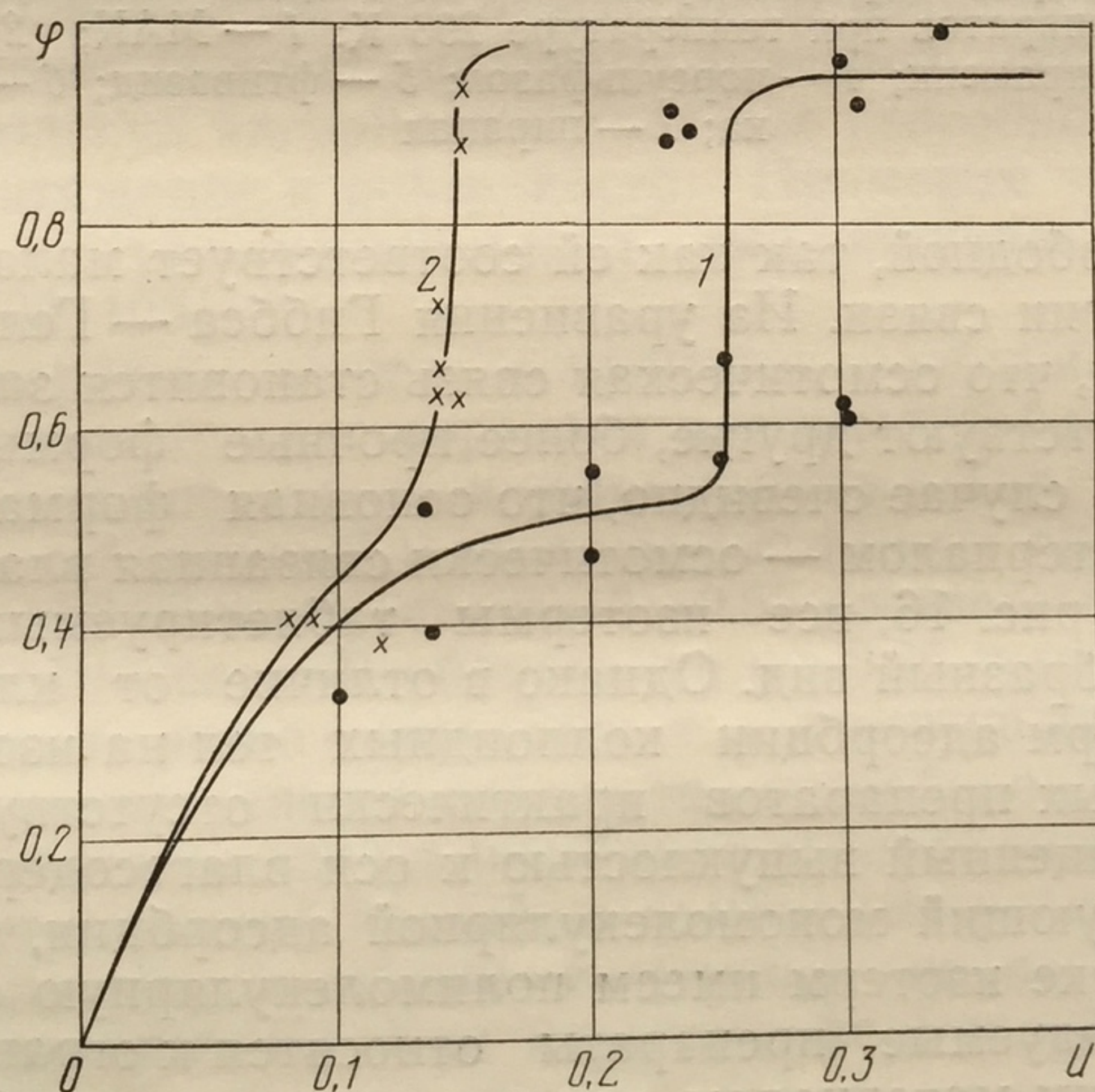


Рис. 15. Изотермы сорбции и десорбции азорибитиламина при температуре 313 К: 1 — сорбция; 2 — десорбция

воримы [60]. При формировании геля скелет состоит из замкнутых клеток, которые имеют стенки из нерастворимых фракций. Растворимые фракции при этом частично попадают внутрь клеток, а частично находятся на внешней поверхности. Внутри клеток концентрация растворимой фракции больше, чем вне клеток, поэтому вода проникает внутрь скелета путем осмоса. Эта влага является

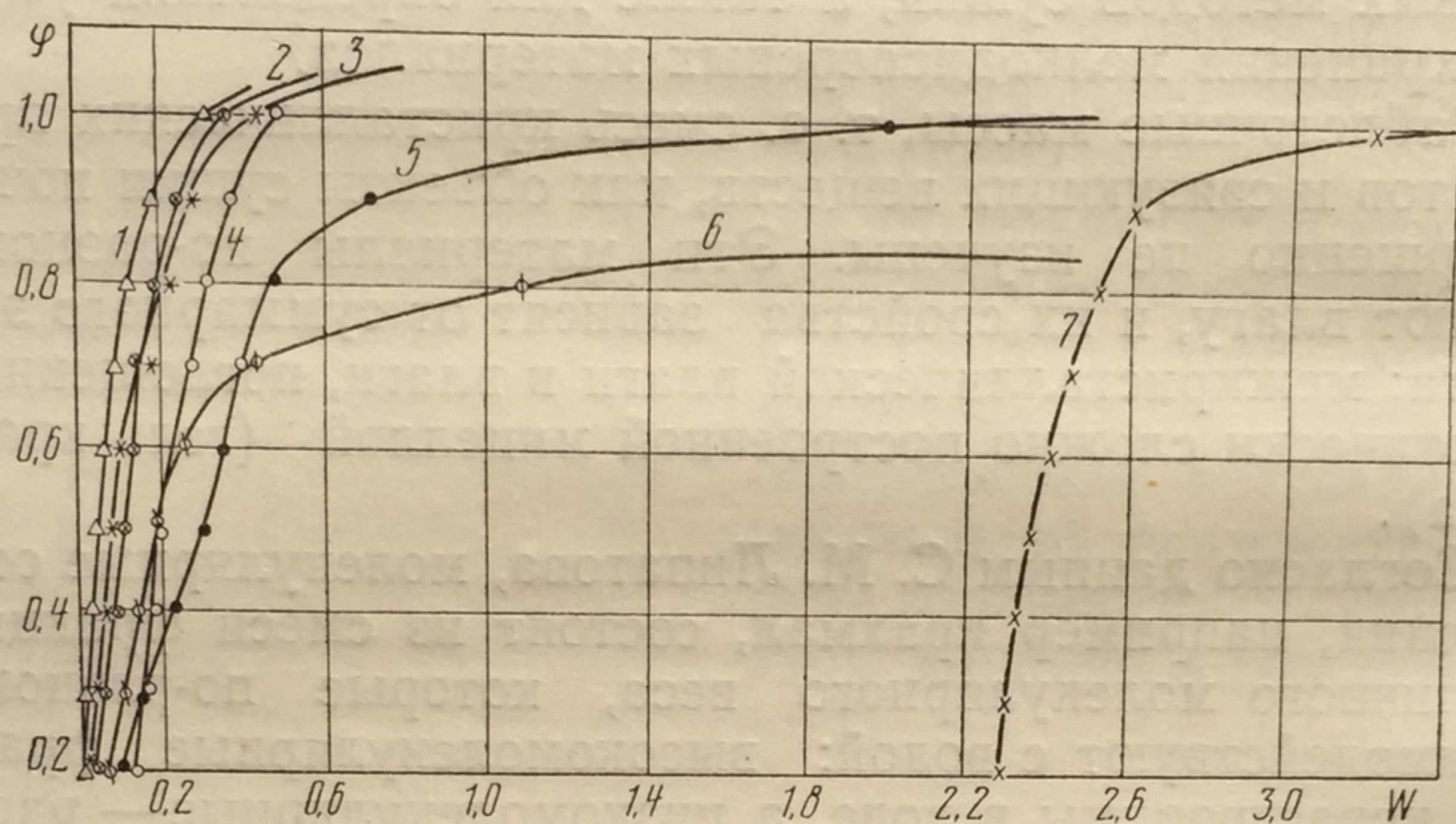


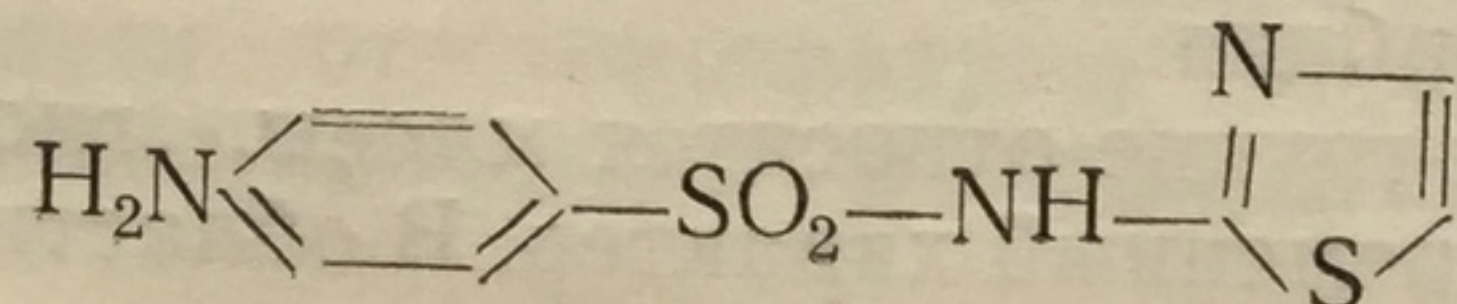
Рис. 16. Изотермы сорбции кристаллоколлоидных химико-фармацевтических препаратов при температуре 293 К: 1 — МАК; 2 — амидопирин; 3 — пирамеин; 4 — норсульфазол; 5 — фтивазид; 6 — тройчатка; 7 — пиранал

как бы свободной, так как ей соответствует малая величина энергии связи. Из уравнения Гиббса — Гельмгольца следует, что осмотическая связь становится заметной, когда отсутствуют другие, более прочные формы связи. В данном случае очевидно, что основная форма связи влаги с материалом — осмотически связанная влага. Как видно из рис. 16, все изотермы таблетлируемых масс имеют S-образный вид. Однако в отличие от классических изотерм адсорбции коллоидных тел на изотермах исследуемых препаратов практически отсутствует участок, обращенный выпуклостью к оси влагосодержания, соответствующий мономолекулярной адсорбции, т. е. на всем участке изотерм имеем полимолекулярную адсорбцию. Исследуемые препараты относятся к ограниченно набухающим материалам, так как изотермы сорбции не пересекаются с прямой $\phi = 1$ (рис. 16). Согласно изотермам кристаллоколлоидных материалов, интенсивность

увеличения равновесной влажности разная и, по-видимому, зависит от свойств исходных компонентов и связующих веществ. Так, интенсивность увеличения равновесной влажности таблетлируемых масс, приготовленных из кристаллических препаратов первой и второй подгрупп (норсульфазол, МАК и др.), значительно ниже третьей подгруппы (фтивазид, кофеин бензоат натрия и др.). Большое влияние на величину равновесной влажности оказывает и количество добавляемого связующего вещества. Чем больше количество крахмального клейстера при одинаковых условиях приготовления таблеточной массы, тем больше равновесная влажность. Например, равновесная влажность таблеточной массы МАК, при приготовлении которой добавили 7—10% крахмального 10%-ного клейстера, в области $\phi = 0—0,7$ значительно меньше, чем МАК, в которой процент добавляемого крахмального клейстера больше в 2—2,5 раза.

Температурная зависимость сорбционно-десорбционных свойств большинства таблетлируемых масс сравнительно проста. С повышением температуры, как правило, уменьшается количество адсорбированного газа при постоянном давлении. Это обусловлено тем, что вследствие возрастания энергии теплового движения все большая часть молекул адсорбата становится способной преодолеть притяжение к поверхности. Примером такой зависимости могут служить массы амидопирина, фтивазида и др. [102, 103].

Препараты, которые в процессе сорбции-десорбции сопровождаются растворением или хемосорбцией, имеют сложную температурную зависимость. Так, изотермы сорбции таблеточной массы норсульфазола при температуре 20—30 °C в области $\phi = 0—0,55$ соответствуют принципу Ле-Шателье. В области же $\phi > 0,55$ температурная зависимость резко изменяется, т. е. с повышением температуры увеличивается количество адсорбированной воды при постоянном давлении. Такое явление можно объяснить хемосорбцией. Одной из возможных реакций может быть гидролиз, подобный гидролизу, происходящему в живых организмах. Как известно, формула норсульфазола имеет вид



При определенной концентрации воды в воздухе создаются условия возможного присоединения молекул НОН к левому радикалу. Этот процесс еще более усиливается в данном случае, так как заданная влажность при сорбции создается за счет присутствия серной кислоты, которая катализирует происходящий процесс. Если исключить существование постоянной ошибки при экспериментировании, то можно сделать вывод, что сорбционно-десорбционные процессы таблеточной массы норсульфазола сопровождаются хемосорбцией.

Экспериментальными данными установлено, что изотермы сорбции и десорбции таблеточных масс имеют S-образный вид, не совпадают между собой и образуют сорбционный гистерезис.

Следует отметить, что по характеру гистерезиса все кристаллоколлоидные препараты можно разделить на три группы:

- 1) материалы, у которых изотермы сорбции лежат выше, чем изотермы десорбции;
- 2) материалы, у которых изотермы сорбции лежат ниже, чем изотермы десорбции;
- 3) материалы с переменной формой гистерезиса.

К первой группе относятся таблетлируемые массы как однокомпонентные, так и многокомпонентные типа фтивазида, пиранала, полученные из мелкокристаллических препаратов (рис. 17, 18).

Во вторую группу входят материалы типа норсульфазола (МАК и др.), у которых изотерма сорбции в координатах (φ — W) лежит ниже, чем изотерма десорбции, т. е. равновесная влажность, определяемая при сорбции, больше, чем при десорбции (рис. 19). Такой характер гистерезиса может быть объяснен следующим. Так как исследовались крупнокристаллические препараты, оводненные крахмальным клейстером, можно предположить, что в результате смешения образуется макropористая структура. Поэтому процесс десорбции можно представить как испарение со свободной поверхности. Этот процесс, не осложняясь вытеснением влаги из капилляров, идет беспрепятственно и быстро. В связи с этим десорбция происходит при меньших значениях равновесной влаги, чем сорбция.

К третьей группе относятся массы, гистерезис которых имеет переменный характер. В области $\varphi=0-0,65$ он

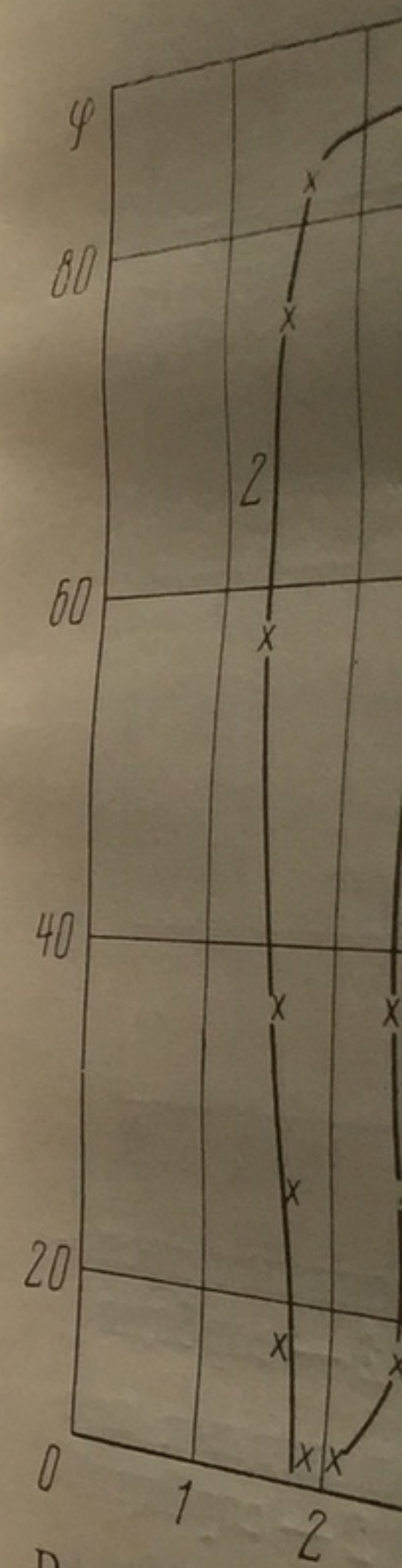


Рис. 17. Изотермы сорбции и десорбции пиранала (пиранала).
Рис. 18. Изотермы сорбции и десорбции фтивазида (фтивазида).

В настоящем исследовании мы выяснили, что для правильного понимания явления сорбции важно знать, что происходит между влажностью и содержанием влаги. Влагосодержание зависит от характера связи влаги с веществом. Изменение содержания влаги в зависимости от влажности воздуха.

типичен для капиллярно-пористых коллоидных тел (сорбционная кривая лежит выше десорбционной), а в области с большей относительной влажностью положение кривых изменяется (равновесная влажность при десорбции ниже, чем при сорбции). Изменение характера гистерезиса в области $\varphi > 0,65$ объясняется растворением или хемосорбцией исходных компонентов (рис. 20).

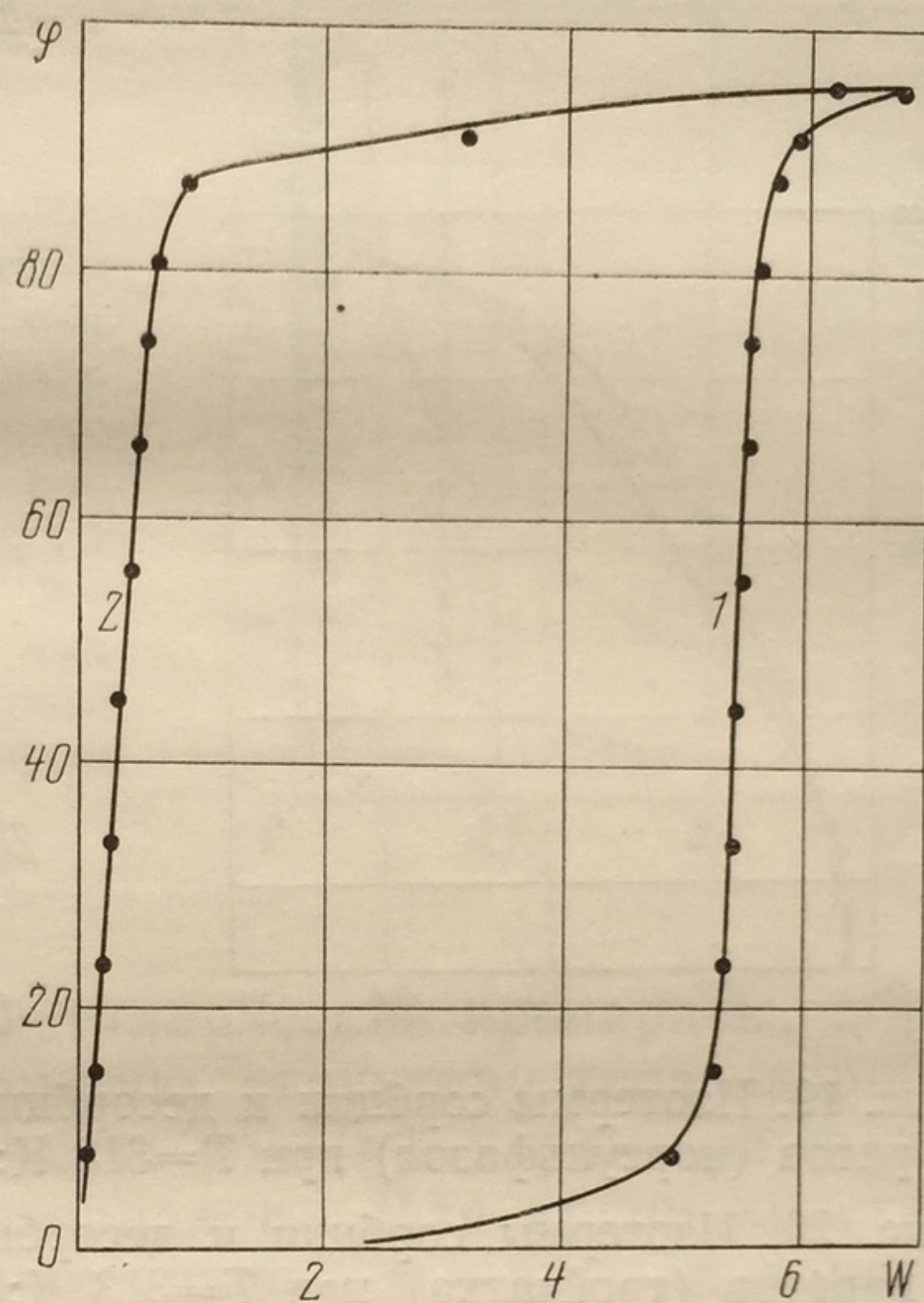
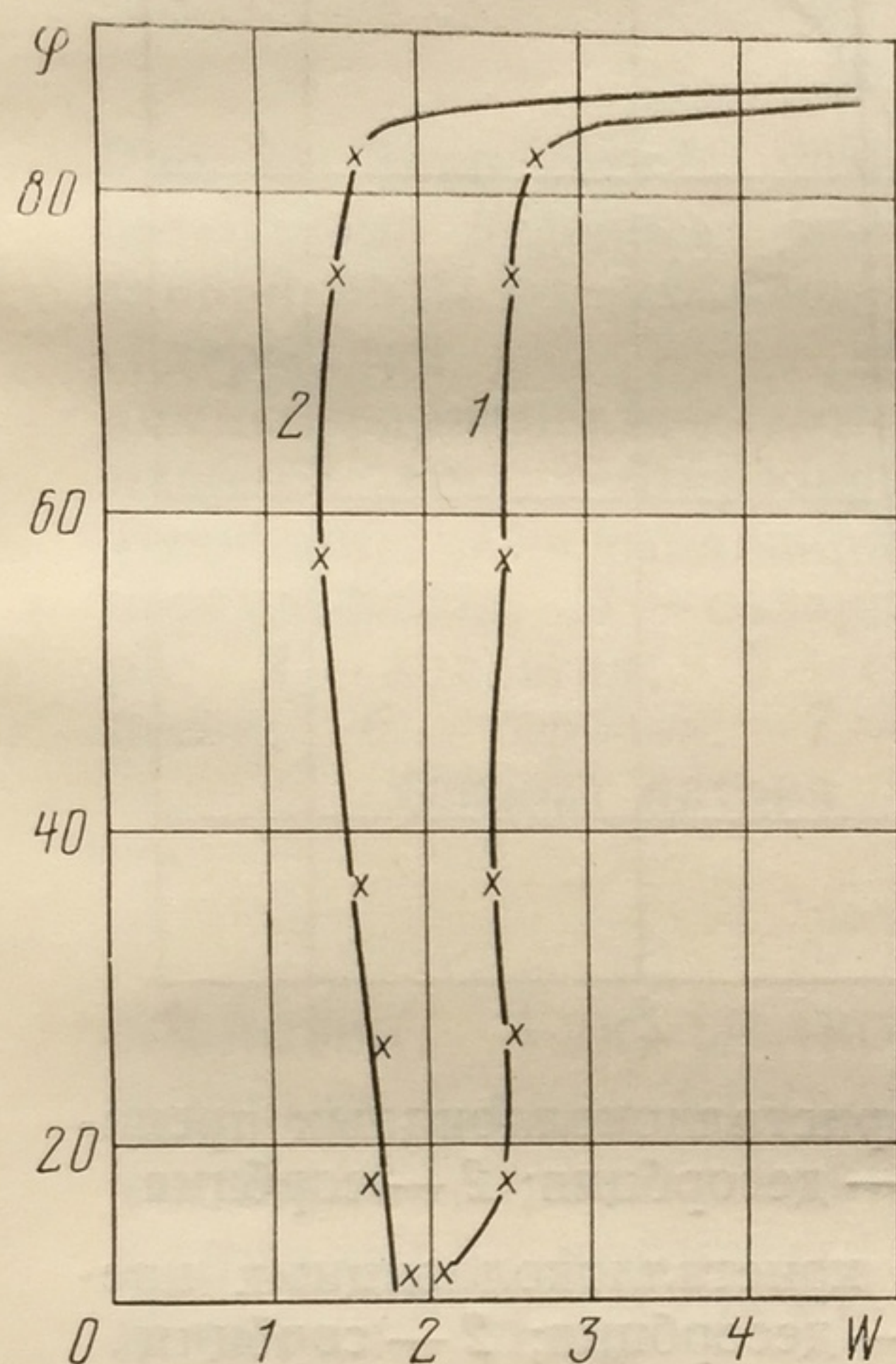


Рис. 17. Изотермы сорбции и десорбции кристаллоколлоидных препаратов (пиранал) при $T = 313$ K: 1 — десорбция; 2 — сорбция

Рис. 18. Изотермы сорбции и десорбции кристаллоколлоидных препаратов (фтивазид) при $T = 313$ K: 1 — десорбция; 2 — сорбция

В настоящее время теории, описывающей аналитически явления сорбции и десорбции, не существует. Поэтому важное значение приобретают эмпирические соотношения между равновесным влагосодержанием и относительной влажностью воздуха [1, 29, 61], которые позволяют с точностью до 1—4% определить равновесное влагосодержание исследуемых препаратов, судить о характере связи воды в материале.

Изменение влагосодержания исследуемых материалов в зависимости от температуры и относительной влажности воздуха приведено в табл. 2 приложения 1.

Из полученных результатов видно, что равновесная влажность даже при больших значениях φ для некоторых препаратов невелика (до 1%). Длительное хранение препаратов, которые склонны к растворению и хемосорбции при относительной влажности воздуха выше 60%, нежелательно.

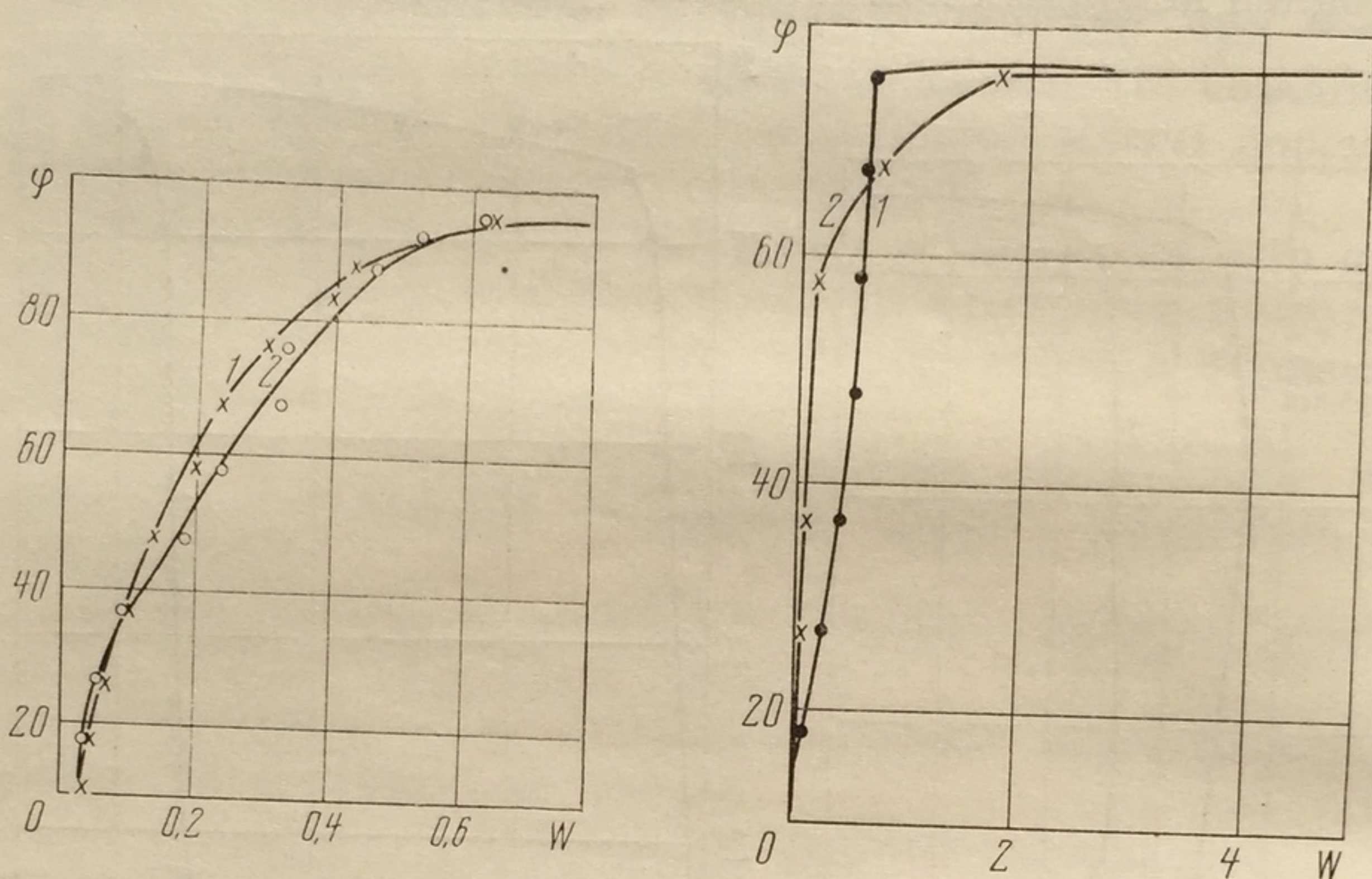


Рис. 19. Изотермы сорбции и десорбции кристаллоколлоидных препаратов (норсульфазол) при $T=313$ К: 1 — десорбция; 2 — сорбция

Рис. 20. Изотермы сорбции и десорбции кристаллоколлоидных препаратов (тройчатка) при $T=313$ К: 1 — десорбция; 2 — сорбция

Важное значение полученные данные имеют для определения энергии связи влаги с материалом, которая, согласно [1, 2, 29], в гигроскопической области равна химическому потенциалу переноса массы вещества.

Величину энергии связи влаги с материалом, а следовательно, и значение химического потенциала химико-фармацевтических препаратов получали по соответствующим изотермам сорбции и десорбции.

Как видно из рис. 21, в процессе постепенного понижения влажности препаратов величина энергии связи непрерывно увеличивается, резко возрастает при переходе ко все более и более прочно связанной влаге. Для большинства химико-фармацевтических препаратов она резко начинает возрастать при влагосодержании 0,002—0,001 кг/кг. Из этого следует, что углубление сушки до

значений влаги
значительным
зи влаги со с
вать при расч
изменения св
(рис. 21), что

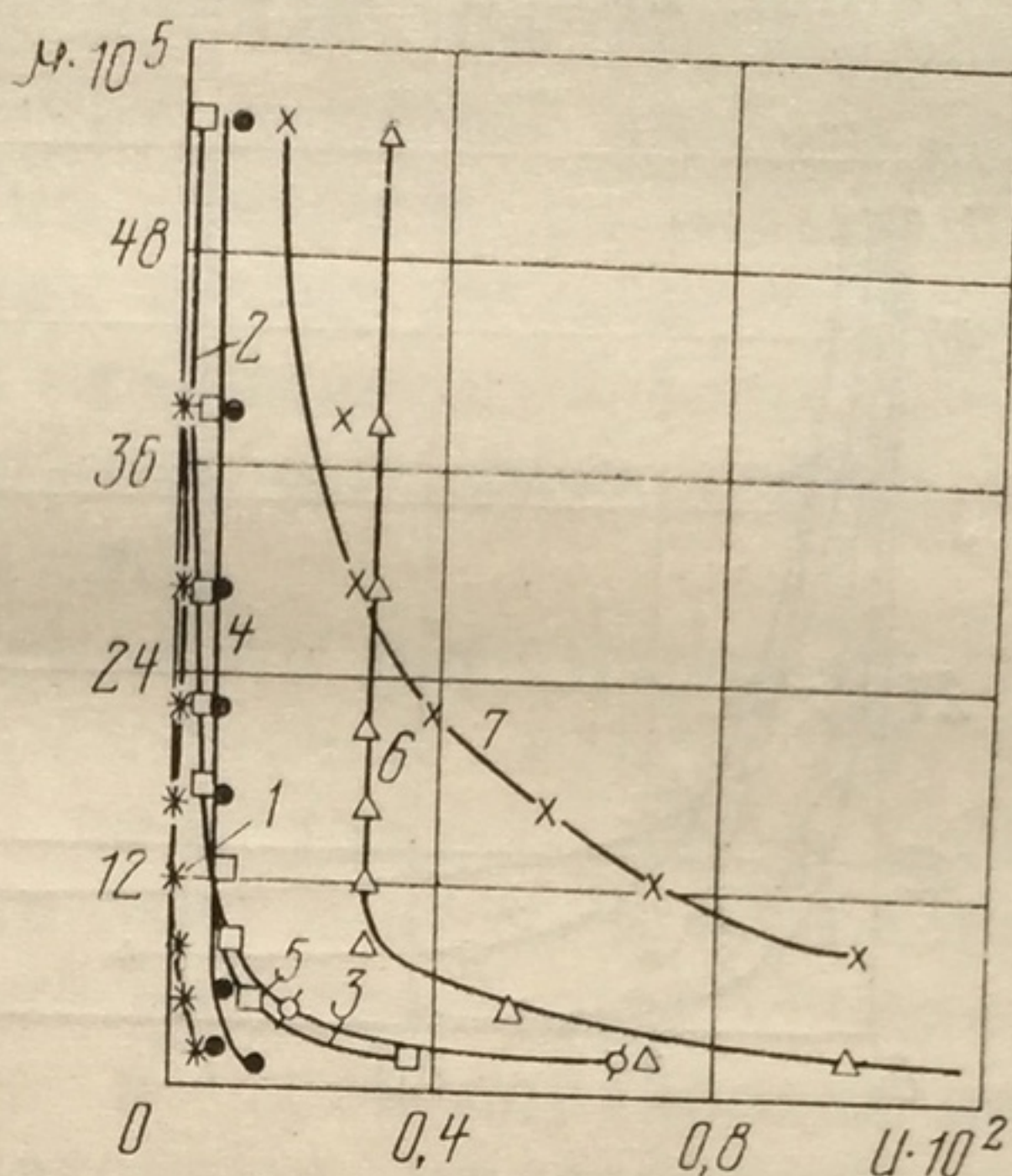
Рис. 21. Зависим
потенциала перен
занной воды от
содержания для
химико-фармацев
препаратов при те
(сорбция): 1 — ам
норсульфазол; 3 —
ра; 4 — аналгин;
песок; 6 — сорб
бензоат н

свойства. Так,
зующие в слое
тиламина, имею
капиллярно-пор
лических (типа
характерен рост
риалом при пост
гигроскопической
дают мономолек
верхности криста
большая затрата
ной практически
удаляется.

Характер изм
ных химико-фарм
свойств исходных
ства добавленного
мального клейстер
шения. Так, табле
вом связующего в
 $\mu = f(u)$, близкую

значений влажности ниже 0,001—0,002 кг/кг связано со значительным ростом тепла на преодоление энергии связи влаги со скелетом вещества. Это необходимо учитывать при расчете расхода тепла на сушку. Характер изменения связи для исследуемых препаратов различен (рис. 21), что указывает на их разные гигроскопические

Рис. 21. Зависимость химического потенциала переноса массы связанной воды от удельного влагосодержания для кристаллических химико-фармацевтических препаратов при температуре 293 К (сорбция): 1 — амидопирин; 2 — норсульфазол; 3 — сахарная пудра; 4 — аналгин; 5 — сахарный песок; 6 — сорбоза; 7 — кофеин бензоат натрия



свойства. Так, мелкокристаллические препараты, образующие в слое микропористую структуру типа азорибитиламина, имеют зависимость $\mu = f(u)$, характерную для капиллярно-пористых материалов. Для крупнокристаллических (типа МАК, норсульфазол и др.) препаратов характерен рост величины энергии связи влаги с материалом при постоянном влагосодержании, так как в гигроскопической области указанные препараты обладают мономолекулярной адсорбционной влагой на поверхности кристаллов, для удаления которой требуется большая затрата энергии. Эта влага является равновесной практически во всем диапазоне ϕ , поэтому она не удаляется.

Характер изменения $\mu = f(u)$ для кристаллоколлоидных химико-фармацевтических препаратов зависит от свойств исходных кристаллических материалов, количества добавленного связующего вещества, например крахмального клейстера, и реологических свойств после смешения. Так, таблеточные массы с небольшим количеством связующего вещества (5—10%) имеют зависимость $\mu = f(u)$, близкую к кристаллическим препаратам (рис.

22), а при увеличении количества крахмального клейстера в 2,3 раза — типичную для коллоидных материалов.

Полученные результаты имеют важное значение для определения расхода тепла на испарение влаги. Как известно, при сушке влажных материалов в дополнение к основной составляющей расхода тепла на испарение свободной влаги необходимо затратить определенное

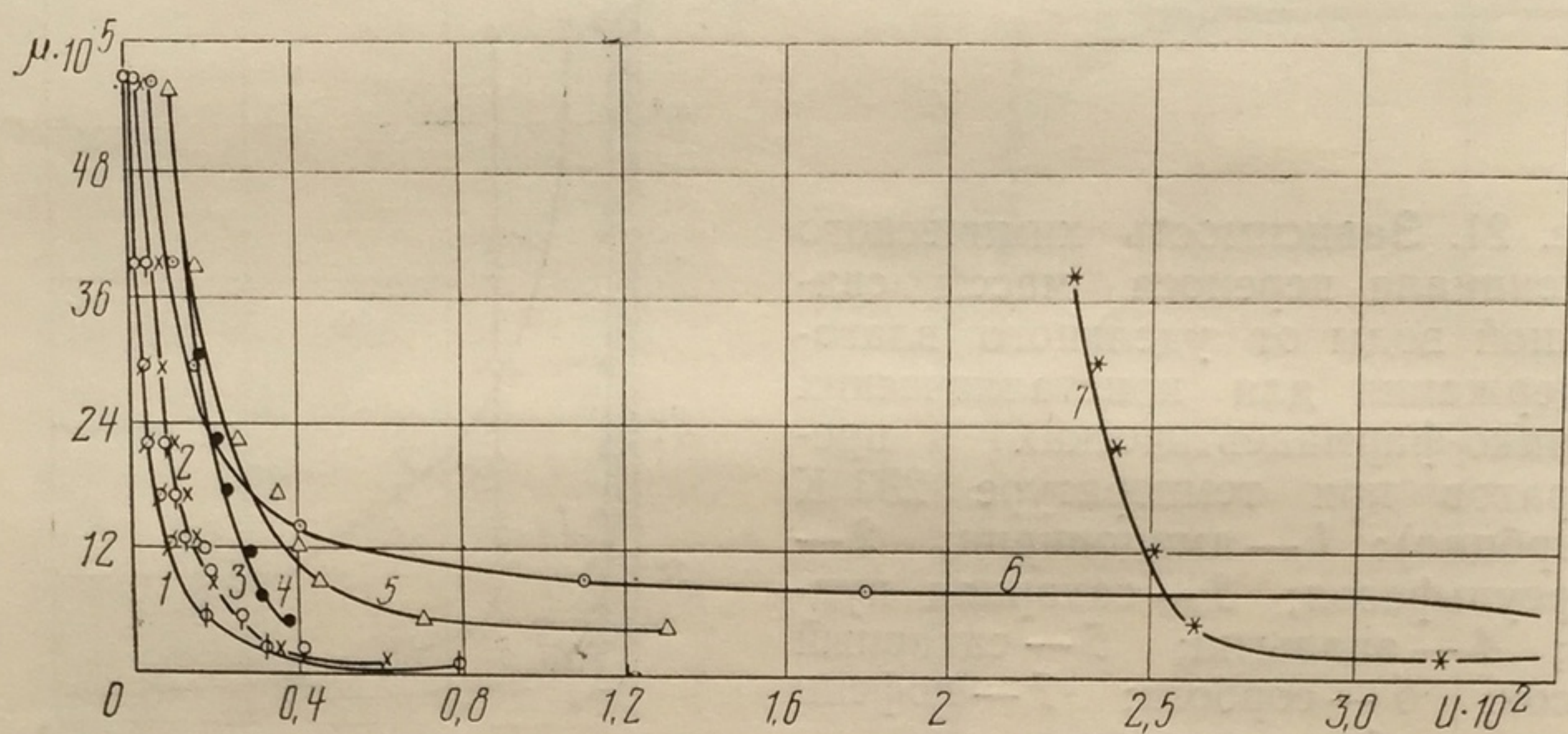


Рис. 22. Зависимость химического потенциала переноса массы связанной влаги от удельного влагосодержания для кристаллоколлоидных химико-фармацевтических препаратов при температуре 293 К: 1 — МАК; 2 — пирамеин; 3 — амидопирин; 4 — норсульфазол; 5 — фтивазид; 6 — тройчатка; 7 — пиранал

количество энергии. Поэтому при расчетах теплового баланса следует исходить из суммарного расхода тепла на удаление влаги

$$Q = Q_n + Q_E,$$

где Q , Q_n , Q_E — соответственно удельная теплота испарения общей, свободной и связанной воды.

Это необходимо учитывать, когда конечная влажность материала низка и энергия связи влаги с материалом может оказать существенное влияние на тепловой баланс сушильной установки. По данным Ю. А. Кавказова [65], на разрушение связи адсорбционной влаги при сушке кожи дополнительно расходуется до 60% тепла от теплоты испарения свободной воды.

Анализ полученных данных показал, что при сушке кристаллоколлоидных химико-фармацевтических препаратов дополнительный расход тепла на преодоление сил

связи влаги с материалом составляет 5—30% от расхода тепла на испарение свободной воды.

Для кристаллических препаратов типа норсульфазола, амидопирин, МАК и т. д., у которых преобладает свободная влага, теплота диссоциации мала и ее можно не учитывать.

Для мелкокристаллических препаратов, образующих в слое микропористую структуру, теплота диссоциации составляет 5—15%. Это должно учитываться только при слоевых методах сушки, так как сушка мелкокристаллических препаратов в активном гидродинамическом режиме происходит без дополнительных тепловых затрат из-за нарушения микроструктуры слоя.

Энергия связи влаги с материалом определяет также характер и направление перемещения влаги внутри продукта или системы, так как на практике очень часто продукты находятся в контакте друг с другом или взаимодействуют через окружающий воздух. Это наблюдается при совместном хранении и транспортировке при производстве, например, таблеточных многокомпонентных препаратов на стадии опудривания.

Таким образом, полученные данные дают возможность найти расход тепла на испарение как свободной, так и связанной влаги, определить основные термодинамические параметры тепло- и массопереноса. Одним из коэффициентов переноса является удельная изотермическая массоемкость c_m . Под удельной изотермической массоемкостью тела понимается такое количество влаги (кг), которое необходимо для увеличения химического потенциала 1 кг абсолютно сухого материала на 1 Дж/моль.

Понятие истинной удельной массоемкости вещества впервые было введено А. В. Лыковым по аналогии с удельной изотермической теплоемкостью как частная производная от удельного влагосодержания по потенциалу влагопереноса при постоянной температуре [1].

Истинная удельная изотермическая массоемкость химико-фармацевтических препаратов вычислялась путем графического дифференцирования кривых удельное влагосодержание — химический потенциал массопереноса при $t = \text{const}$. Как следует из рис. 23, 24 и табл. 2 приложения 1, значение истинной удельной изотермической массоемкости всех исследуемых препаратов при $u =$

$=\text{const}$ практически не зависит от температуры. Так, кривые, выражающие зависимость значений истинной удельной изотермической массоемкости от удельного влагосодержания при постоянной температуре, для таких препаратов, как таблеточные массы МАК, норсульфазола, амидопирин, аналгина, а также для всех кристаллических препаратов при различных температурах, вообще совпадают. Следовательно, величина истинной удельной изотермической массоемкости исследованных химико-фармацевтических материалов при $u=\text{const}$ не зависит от температуры. Следует заметить, что и теплоемкость медицинских препаратов, зависящих от их природы и структуры при повышении температуры, изменяется незначительно (см. приложение 1, табл. 3).

Значение истинной удельной изотермической массоемкости при постоянной температуре с увеличением удельного влагосодержания для большинства химико-фармацевтических препаратов возрастает. Чем выше влагосодержание, тем больше тангенс угла наклона касательной к точке кривой $u=f(\mu)$. Однако интенсив-

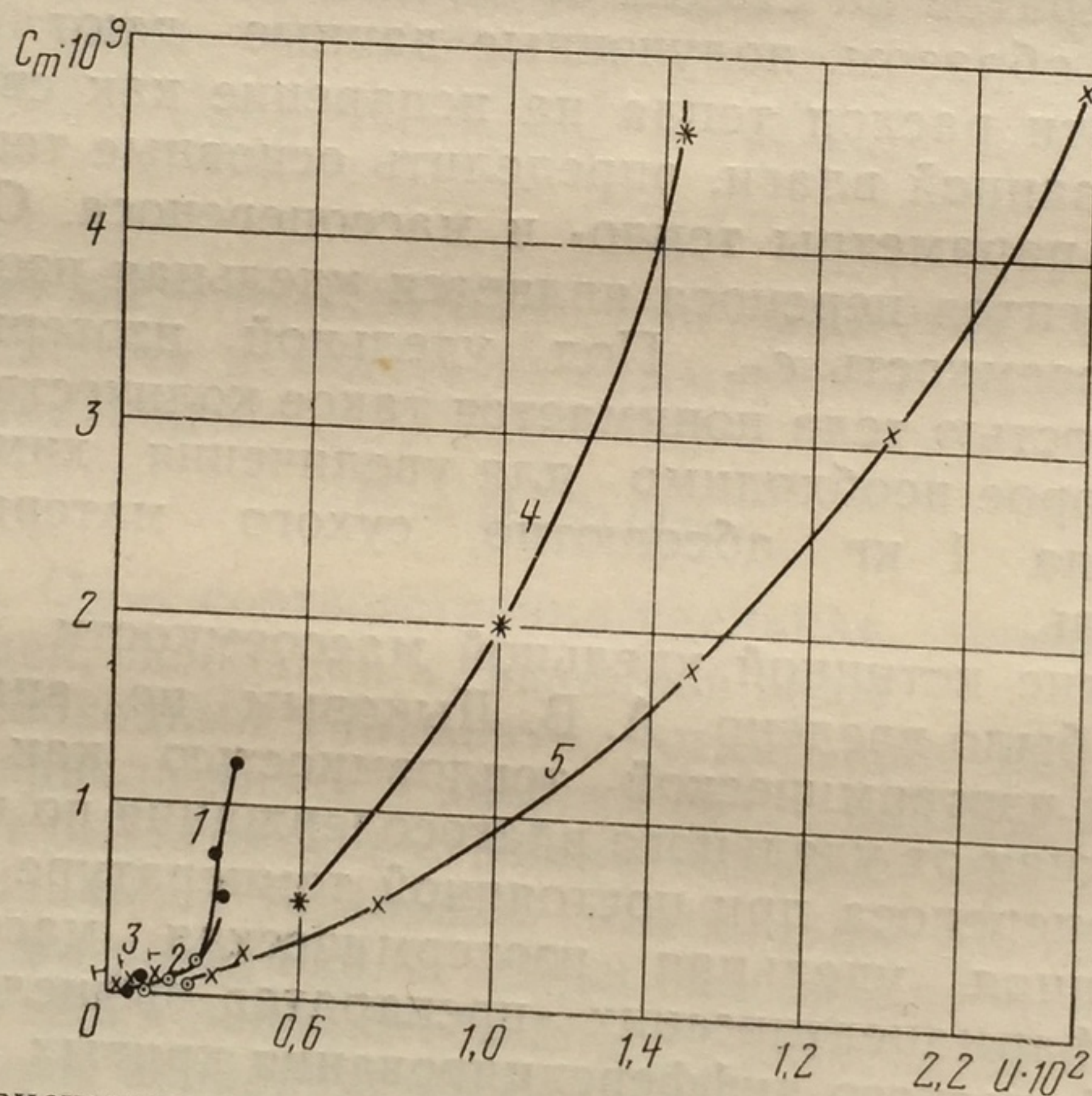
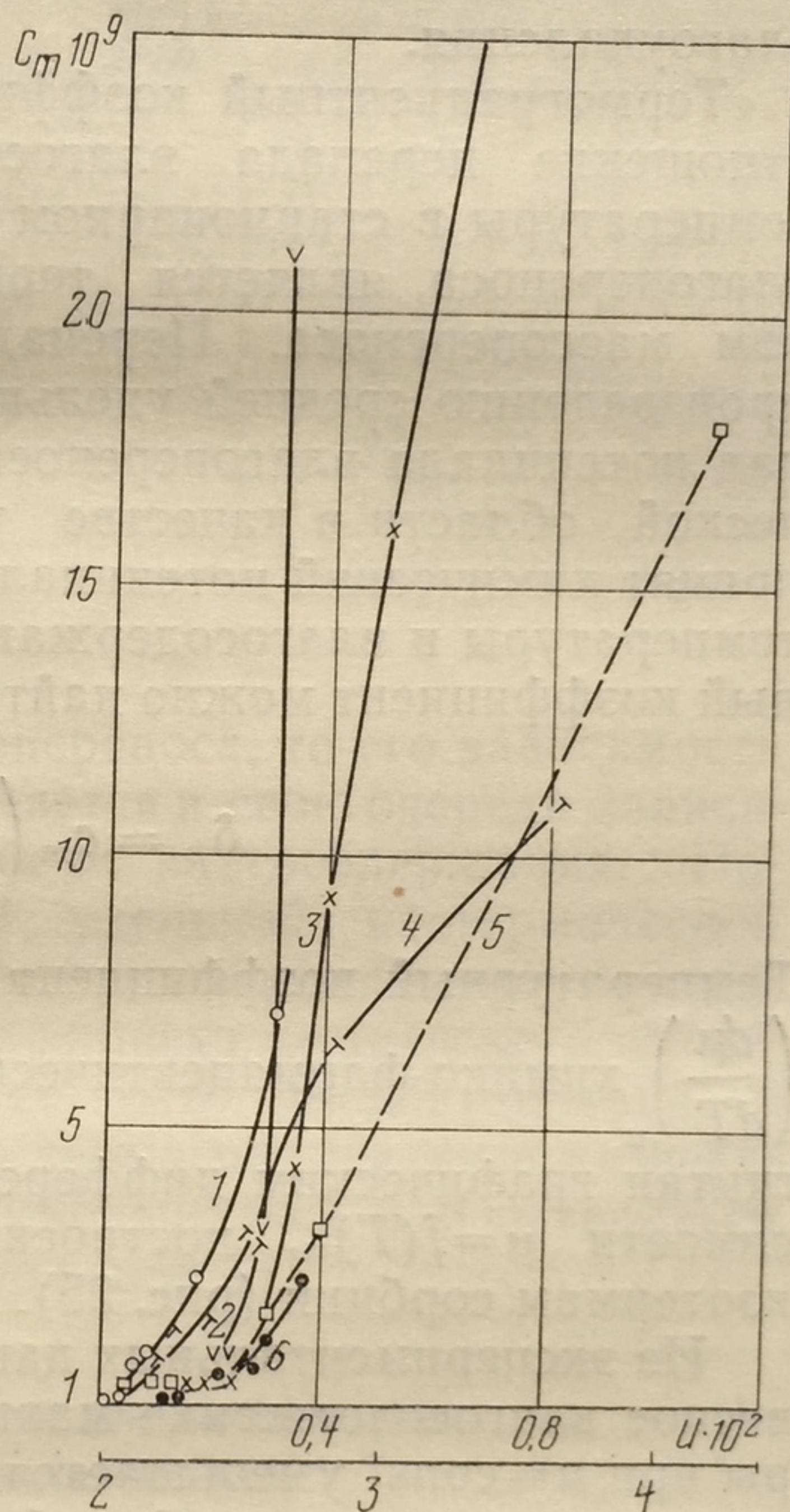


Рис. 23. Зависимость истинной удельной изотермической массоемкости от удельного влагосодержания для кристаллических химико-фармацевтических препаратов при температуре 293 К: 1 — аналгин; 2 — азорибитиламин; 3 — сахар; 4 — сорбоза; 5 — кофеин бензоат натрия

ность увеличения их разная и зависит от форм связи влаги с материалом. Наибольшую интенсивность возрастания удельной массоемкости от влагосодержания имеют кристаллоколлоидные препараты типа МАК, норсульфазола, амидопирин, меньшую — капиллярно-пористые материалы типа кофеин бензоат натрия.

Необходимо обратить внимание на кристаллические препараты типа норсульфазола, амидопирин и др., относящиеся к первой группе, для которых удельная изотермическая массоемкость незначительная и не зависит от влагосодержания. Это связано с тем, что в гигроскопической области рассматриваемая группа материалов имеет мономолекулярную адсорбированно-связанную влагу и

Рис. 24. Зависимость истинной удельной изотермической массоемкости от удельного влагосодержания для кристаллоколлоидных химико-фармацевтических препаратов при температуре 293 К: 1 — МАК; 2 — пиранал; 3 — фтивазид; 4 — пирамеин; 5 — тройчатка; 6 — норсульфазол



постоянное влагосодержание практически во всем интервале ϕ . Такая же картина наблюдается для большинства препаратов в области $u=0-0,0015$ кг/кг, т. е. массоемкость в этой области практически остается постоянной и не зависит от влагосодержания.

В табл. 2 приложения 1 приведены значения удельной изотермической влагоемкости для химико-фармацевтических препаратов при разных значениях относительной влажности воздуха и температуры.

Анализ процессов внутреннего влагопереноса невозможен без знания величины термоградиентного коэффициента и характера его изменения в гигротермическом процессе. При интенсивных способах сушки создаются значительные градиенты температуры в материале, которые в сочетании с большим термоградиентным коэффициентом оказывают значительное влияние на процесс влагоудаления.

Термоградиентный коэффициент, определяемый как отношение перепада влагосодержания Δu к перепаду температуры в стационарном состоянии при отсутствии влагопереноса, является термодинамическим параметром массопереноса. Перепад влагосодержания равен произведению средней удельной влагоемкости на перепад потенциала влагопереноса. Поскольку в гигроскопической области в качестве потенциала влагопереноса принят химический потенциал μ , являющийся функцией температуры и влагосодержания тела, то термоградиентный коэффициент можно найти по выражению

$$\delta_p = c_m \left(\frac{d\mu}{dT} \right)_u.$$

Температурный коэффициент химического потенциала $\left(\frac{d\mu}{dT} \right)_u$ химико-фармацевтических материалов был рассчитан графическим дифференцированием кривых зависимости $\mu = f(T)_u$, построенных по экспериментальным изотермам сорбции (рис. 25).

Из экспериментальных данных видно, что если равновесное влагосодержание материала с ростом температуры при $u = \text{const}$ уменьшается, то химический потенциал массопереноса по своей абсолютной величине также уменьшается (температурный коэффициент положителен), и, наоборот, в том случае, если равновесное влагосодержание материала с ростом температуры при $u = \text{const}$ увеличивается, то химический потенциал массопереноса по своей абсолютной величине возрастает (температурный коэффициент отрицателен). Следует отметить, что температурный коэффициент химического потенциала для большинства исследуемых препаратов, которые в процессе обработки не подвергаются разложению, положителен. Для таблеточных препаратов типа

МАК, 1
ся хемо
нием в
отрица
Так
ляет со
ской ма

Рис. 25. З
ного коэф
потенциал
удельного
кристалло
при темпе
чатка; 2

мического
ст влагос
мостью у
скольку з
массоемко
стает, а те
циала ма
отрицатель
циента мо
постоянной

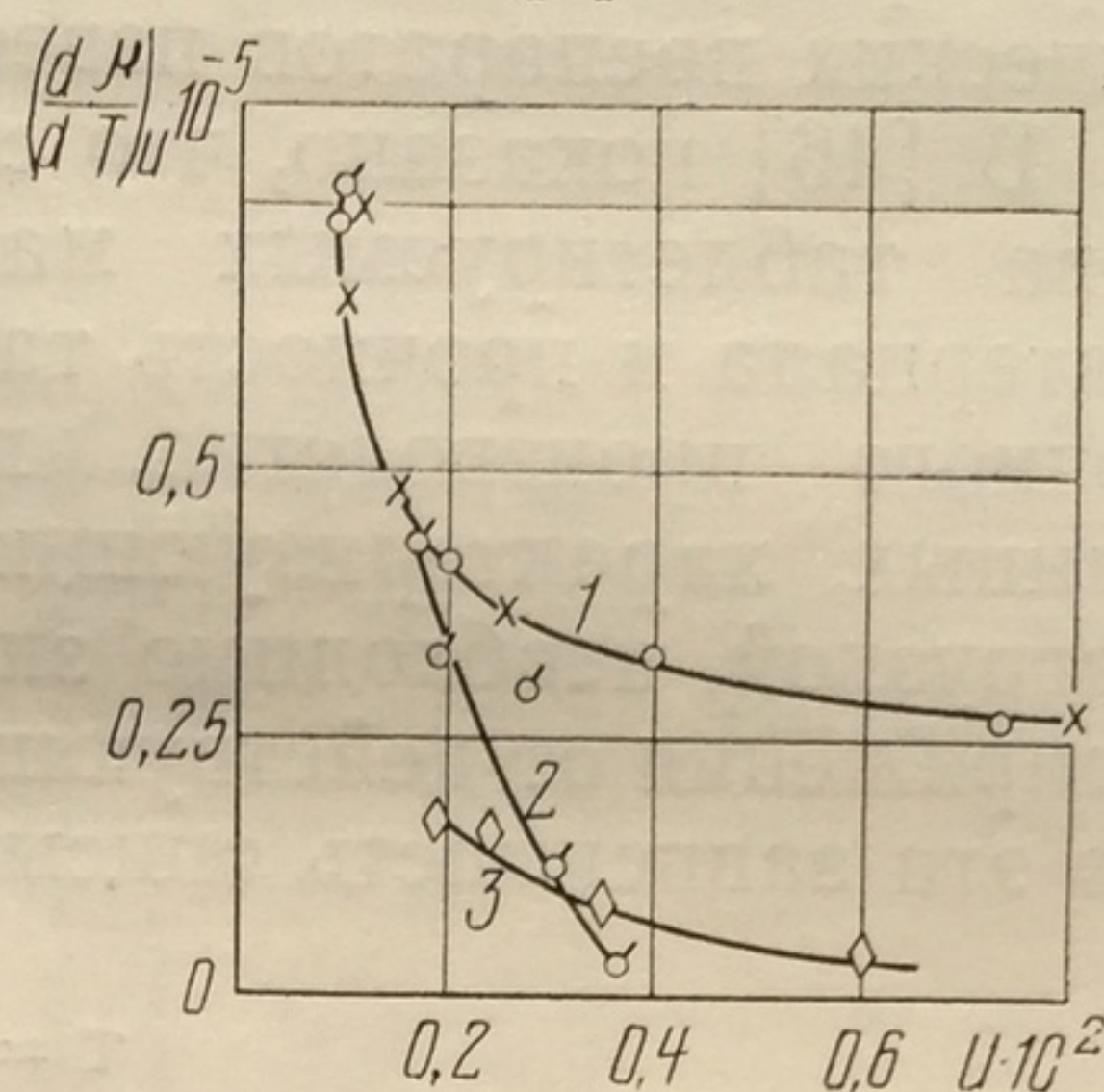
2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХИМИКО-ФА

Х
ставляют со
ные массы)
структурооб
ном счете ка
процесса вла
массоперенос
зования в ди
цесса являю

МАК, норсульфазола, которые при $\varphi > 70\%$ подвергаются хемосорбции, температурный коэффициент с увеличением влагосодержания может быть положительным и отрицательным в зависимости от направления реакции.

Так как термоградиентный коэффициент представляет собой произведение истинной удельной изотермической массоемкости и температурного коэффициента хи-

Рис. 25. Зависимость температурного коэффициента химического потенциала массопереноса от удельного влагосодержания для кристаллоколлоидных материалов при температуре 293 К: 1 — тройчатка; 2 — норсульфазол; 3 — амидопирин



мического потенциала массопереноса, то его зависимость от влагосодержания определяется в свою очередь зависимостью указанных величин от влагосодержания. Поскольку значение истинной удельной изотермической массоемкости с увеличением влагосодержания возрастает, а температурный коэффициент химического потенциала массопереноса может быть положительным и отрицательным, то величина термоградиентного коэффициента может возрастать, уменьшаться или оставаться постоянной (см. табл. 2 приложения 1).

2.3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Химико-фармацевтические препараты представляют собой двухфазные или трехфазные (таблеточные массы) дисперсные структуры. Эффективностью структурообразования этих масс определяется в конечном счете качество готового продукта. Интенсивность процесса влажного гранулирования, кинетика тепло- и массопереноса зависят от эффективности структурообразования в дисперсных системах. Критериями этого процесса являются реологические характеристики: коэффи-

коэффициент предельного напряжения сдвига \bar{P}_h и пластическая вязкость η_m , с помощью которых можно рассчитать рабочие органы машин, производительность и энергосиловые параметры процесса.

Работ по определению реологических характеристик для порошковых материалов, а также по вопросам структурно-реологических характеристик химико-фармацевтических препаратов известно немного [67—74].

В [46] показано, что структурно-механические свойства таблетлируемых масс определяют прессуемость материала и прочность таблеток. Для технологии таблеточного производства, кроме полных реологических данных, характеризующих поведение материала под нагрузкой, необходимо знать зависимость сдвигающего напряжения от действующей нормальной нагрузки. Обычно эта зависимость описывается уравнением Кулона

$$\tau = \tau_0 + \mu\sigma,$$

где τ_0 — сцепление; μ — коэффициент внутреннего трения; σ — нормальная нагрузка. Как известно, физический смысл τ и τ_0 тот же, что и предельного напряжения сдвига. Ввиду того что величины τ_0 и μ являются материальными константами, они необходимы для характеристики свойств исследуемых препаратов.

Предельное напряжение сдвига вычислялось на коническом пластометре с разным влагосодержанием (980—1836 Н/м²) [46]. Однако выбранный пластометр по сравнению с другими методами дает завышенные значения даже с учетом поправки. Несмотря на методическую простоту этого метода, он в данном случае (зависимость τ от σ) вызывает трудности в оформлении прибора.

Для исследования химико-фармацевтических материалов были выбраны приборы одноплоскостного сдвига, вращательного среза и метод принудительного скашивания [75—78].

Исследование реологических свойств проводилось в Институте торфа АН БССР на приборе ПС-10, который предназначен для испытания грунтов [74]. При испытаниях обнаружилось, что напряжения более $24,5 \cdot 10^4$ Н/м² приводят к отжатию воды из препарата, непостоянство площади среза — к значительным отклонениям при повторных испытаниях; величина зазора изменяется; опыт

моделирует ползучесть материала, а не истинное его поведение, например, в шнековом механизме.

Экспериментальные данные показывают, что значения коэффициента внутреннего трения завышены, т. е. конструкция прибора не позволяет производить сдвиг с высокими скоростями из-за ограниченности хода сдвигаемой обоймы.

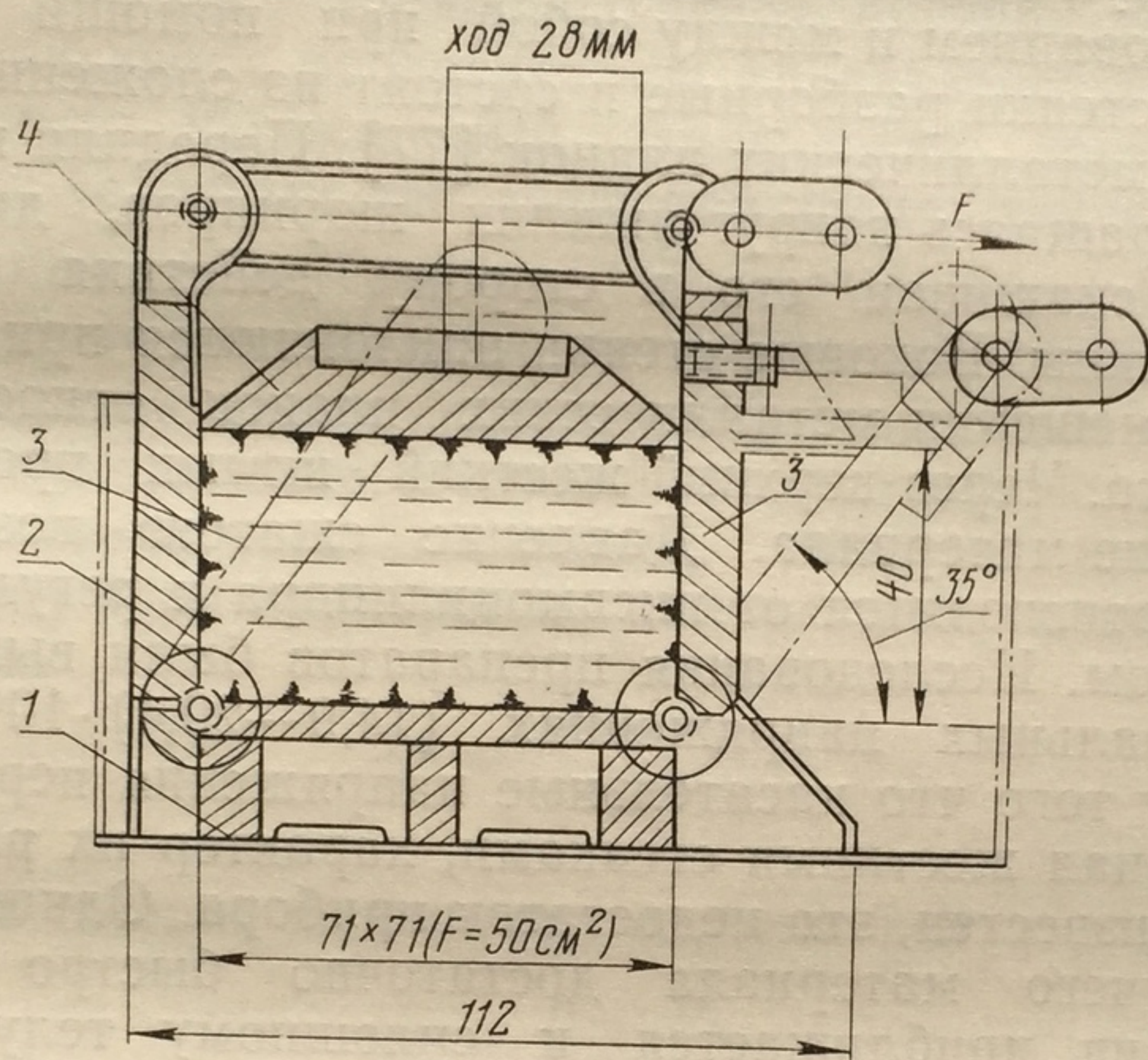


Рис. 26. Схема прибора Ломизе—Гуткина—Жукова: 1 — основание; 2 — жесткие передняя и задняя стенки; 3 — материал; 4 — жесткий штамп

Приборы вращательного среза лишены недостатков, которые свойственны для приборов однополостного среза. Сдвиг в них осуществляется по бесконечной плоскости. Однако из-за невозможности определения зоны сдвига и вычисления относительной деформации сдвига эти приборы не пригодны для получения деформационных характеристик. Они могут лишь использоваться для определения прочностных характеристик [77].

Для исследования реологических характеристик был изготовлен прибор типа Ломизе — Гуткина — Жукова (рис. 26), который позволял проводить опыты в условиях, близких к чистому сдвигу [77]. Достоинством этого прибора является возможность исследования мате-

риала, находящегося как в пластичном, так и в сыпучем состоянии. С помощью такого прибора нагружение материала нормальными и тангенциальными нагрузками осуществлялось одновременно, а скашивание (объемный сдвиг) — принудительно.

Эксперименты выполняются следующим образом. Материал помещается в коробку, состоящую из основания 1 и двух жестких параллельных стенок 2, соединенных с основанием и между собой при помощи планок. Боковые стенки разборные и состоят из сложенных друг на друга металлических планок [77]. Передняя и задняя стенки, вращаясь вокруг нижних шарниров, давят на образец, скашивая его в сторону действия горизонтальной силы. Боковые стенки наклоняются при свободном перемещении металлических планок относительно друг друга. Через верхний жесткий штамп происходит упрочнение материала. Давление сжатого воздуха на штамп производится от пневмоцилиндра и регулируется редуктором. Исследования препаратов были выполнены при нормальных напряжениях $((4,9—29,4) \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2)$.

Ввиду того что касательные напряжения передаются на материал жесткими стенками, характер их распределения неизвестен, это недостаток прибора. Однако образец сыпучего материала достаточно быстро по мере уплотнения приближается к сплошному телу и скашивание стремится к чистому сдвигу. На приборе снимались кривые кинетики развития и спада деформации при постоянной нагрузке, по которым по разгрузочной ветви определялись величины ϵ'_0 , ϵ'_2 , ϵ'_m (быстрая, медленная, высокоэластическая и остаточная деформации), а относительная деформация ϵ — из формулы: $\epsilon = \Delta/h$, где Δ — отсчет по индикатору; h — высота расположения индикаторов.

Напряжение сдвига находилось как $P = F_1/S$, где F_1 — сдвигающая сила в плоскости, равная: $F_1 = \frac{F H_1}{h_1}$;

H_1 — высота приложения силы; h_1 — точка приложения силы (высота засыпки материала); S — площадь сечения коробки прибора в плане.

По графикам кинетики деформации получали следующие величины: модуль быстрой высокоэластической деформации $G_0 = P/\epsilon_0$; модуль медленной высокоэласти-

ческой деформации
 $= P/(\epsilon_0 + \epsilon_2)$
 скорости опр
 грузки:

а по ϵ'_m , P стр
 найти следую
 лы текучести
 чести P_{k1} ; усл
 прочностные
 ницу шведовс
 ность межагр
 границу бинг
 ность внутри
 ползучести ха
 вязкостью

а область теч

Из производн
 период истин
 пластичность

скую пластич

Исследова

стик проводил

ституте торфа

табл. 3 прило

кон Кулона н

крахмального

объяснено воз

структуры из

жения среза,

цами, равны 9

ния кристалли

пирина близк

ческой деформации $G_2 = P/\epsilon_2$; равновесный модуль $G_m = P/(\epsilon_0 + \epsilon_2)$ эластичности $\lambda = G_0/(G_0 + G_2)$. Градиент скорости определялся отношением ϵ_m ко времени разгрузки:

$$\epsilon'_m = \frac{\epsilon_m}{t},$$

а по ϵ'_m , P строилась кривая течения, которая позволяла найти следующие реологические характеристики: пределы текучести P_k ; условный статический предел текучести P_{k_1} ; условный динамический предел текучести P_{k_2} ; прочностные характеристики P_r^0 : верхнюю условную границу шведовской ползучести, характеризующую прочность межагрегатных связей, и P_m^r — нижнюю условную границу бингамовского течения, характеризующую прочность внутриагрегатных связей. Область шведовской ползучести характеризуется наибольшей пластической вязкостью

$$\eta^* = \frac{P - P_{k_1}}{\epsilon'_m},$$

а область течения по Бингаму наименьшей

$$\eta_m^* = \frac{P - P_{k_2}}{\epsilon'_m}.$$

Из производных реологических характеристик получали период истинной релаксации по Шведову $\theta_1 = \eta_0^*/G_m$, пластичность по Воляровичу $\psi_1 = P_{k_1}/\eta_0^*$ и динамическую пластичность $\psi_2 = P_{k_2}/\eta_m^*$.

Исследования структурно-механических характеристик проводились на приборе вращательного среза в Институте торфа АН БССР. Результаты представлены в табл. 3 приложения 1. Как показали эксперименты, закон Кулона не выполняется для масс с добавлением крахмального клейстера. Это отклонение может быть объяснено возникновением в системе пространственной структуры из геля крахмала. Пределы колебаний напряжения среза, характеризующие сцепление между частицами, равны 980—7840 Н/м². Сопротивление перемещения кристаллических порошков норсульфазола и амидопирин близко, но амидопирин при сдвиге упрочняется

и сопротивление сдвигу в разрушенной массе больше, чем в ненарушенной структуре. Таким образом, силовой и энергетический расчеты для амидопирин необходимо производить по максимальным величинам разрушенной структуры.

Особое значение структурно-механические свойства приобретают для таблеточных масс, так как они определяют интенсивность, качество сушильного процесса и готовых таблеток.

Добавка 5%-ного крахмального клейстера к норсульфазолу резко снижает прочность сцепления ($980—1960 \text{ Н/м}^2$). Коэффициент внутреннего трения не изменяется ($0,185—0,23$) при введении добавок от 20 до 40% к норсульфазолу. При компоновке таблеточной массы из 10%-ного крахмального клейстера прочность контактов между частицами увеличивается, однако вязкость системы уменьшается. Уменьшается также коэффициент внутреннего трения, его значение находится в пределах $0,09—0,15$.

В разрушенной таблеточной массе амидопирин (система амидопирин + крахмальный клейстер) коэффициент внутреннего трения для всех случаев очень низкий ($0,01—0,05$), т. е. сопротивление системы сдвигу при разных нормальных напряжениях практически не зависит от него.

Барбитуровая кислота чисто кристаллическая в ненарушенном и нарушенном состоянии имеет примерно одинаковые значения τ_0 .

В табл. 4 приложения I приведены значения характеристик для трех партий тетрациклина основания (ТЦО). Эти партии отличались только временем механической обработки в центрифугах. Так, время обработки ТЦО-0 составляло 35—40 мин, ТЦО-I — 20, ТЦО-II — 5—10 мин. Наименьшую прочность контактов имеет ТЦО-I, а наибольшую — ТЦО-II. В разрушенном состоянии ТЦО-I снижает τ_0 с 1960 до 980 Н/м^2 , а ТЦО-II — с 5880 до 4410 Н/м^2 . Но коэффициент внутреннего трения наименьший у ТЦО-II. ТЦО-0 требует наибольших энергетических затрат на перемещение в механизме, например в грануляторе, шнеке.

Исследование реологических свойств ТЦО показало, что они могут быть отнесены к классу условно-пластических систем, при давлениях $1960—68\,600 \text{ Н/м}^2$ имеется

ярко в
предел
Уча
котор
их в эт
по Шве
цы P_r^0

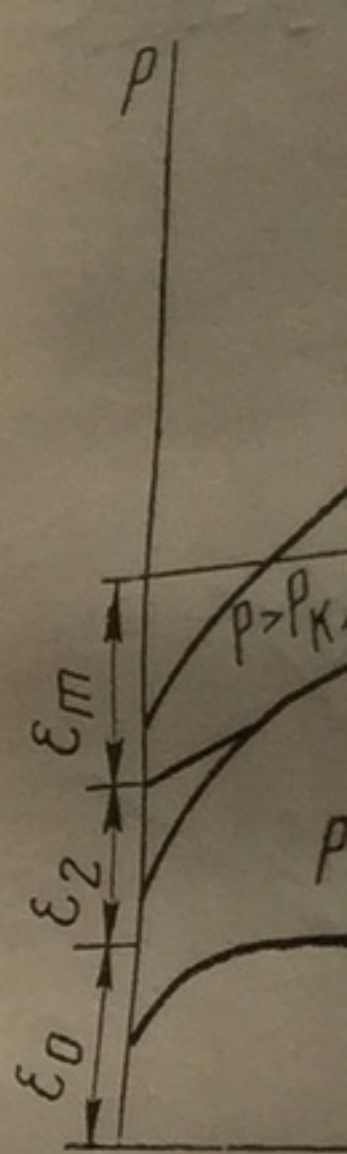
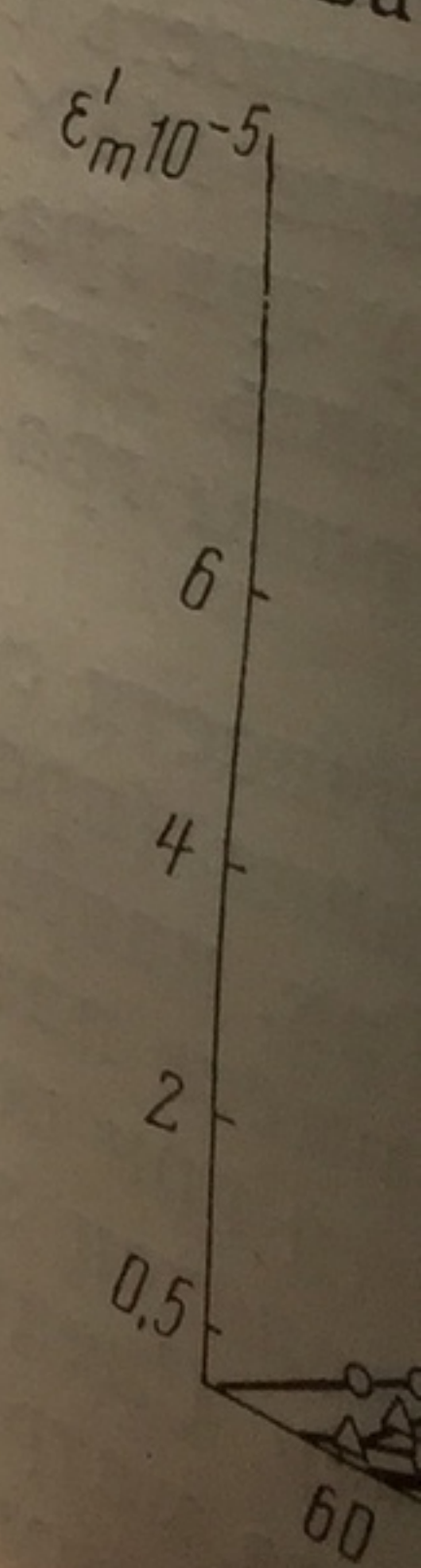


Рис.

В област
шаются,
детельств
Анали
ложение
увеличива



ярко выраженный предел текучести, соответствующий предельному напряжению сдвига (рис. 27—31).

Участок $P < P_{k1}$ является псевдоупругой областью, которая характеризуется модулями G_0 , G_2 , G_m , значения их в этой области почти постоянны. В области течения по Шведову модули уменьшаются значительно до границы P_r^0 , а затем остаются практически постоянными.

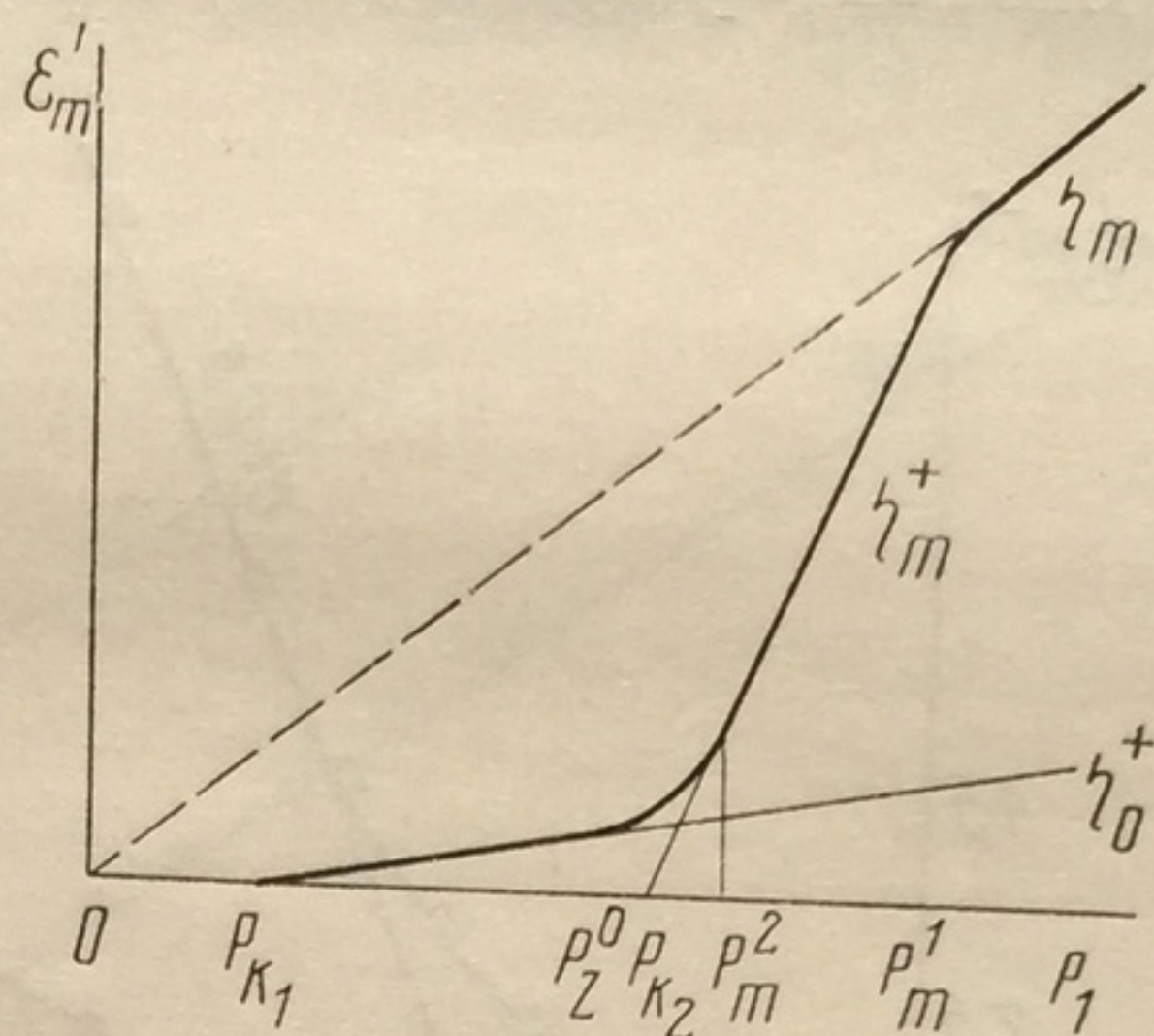
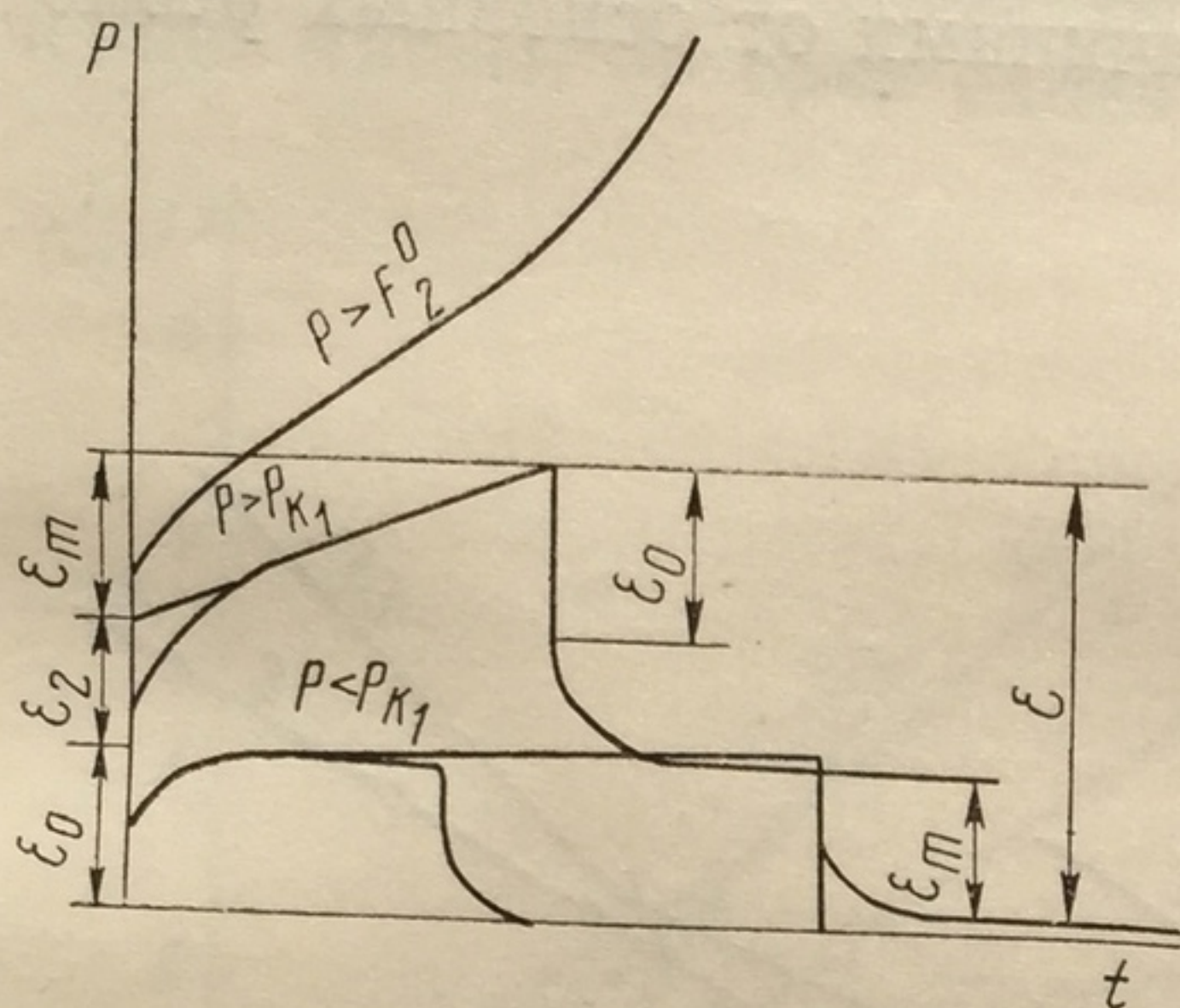


Рис. 27. Кривая кинетики деформаций при $P = \text{const}$

Рис. 28. Кривая течения условно-пластической системы

В области бингамовского течения модули вновь уменьшаются, а затем значения их стабилизируются. Это свидетельствует об изменениях в структуре вещества.

Анализ данных по эластичности показывает (см. приложение 1, табл. 4), что с ростом давления она вначале увеличивается, а затем падает или остается постоянной.

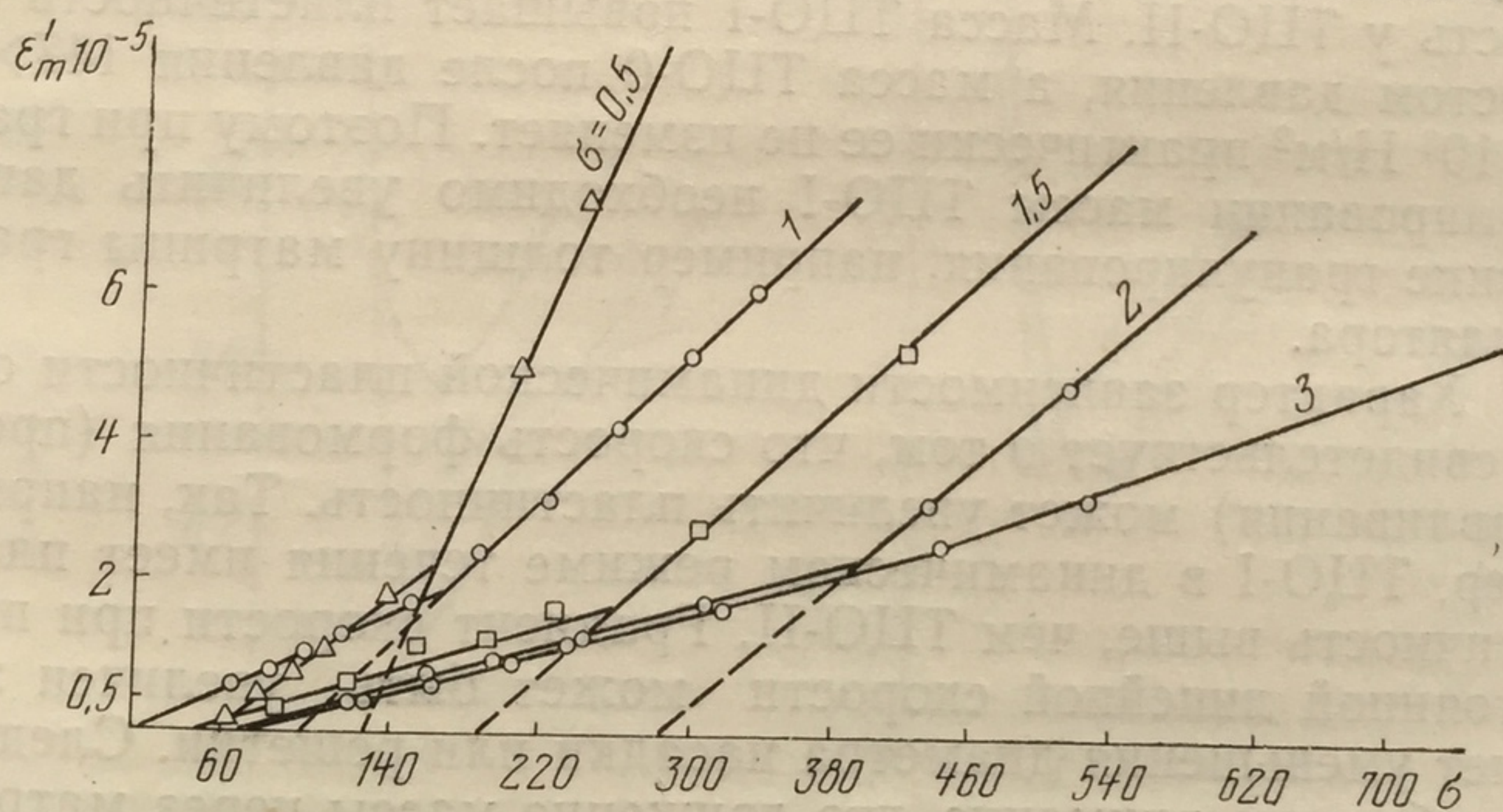


Рис. 29. Кривая течения ТСО-I

Наибольшей эластичностью обладает ТЦО-II. Рост эластичности свидетельствует об увеличении доли эластичных деформаций ϵ_2 , что, по исследованиям С. П. Ничипоренко и др. [67, 68], — наилучшее условие для формирования принудительного гранулирования. Кроме того, эти процессы зависят от пластичности ψ_1 и периода релаксации θ в шведовской области ползучести, которые являются производными величинами от основных реоло-

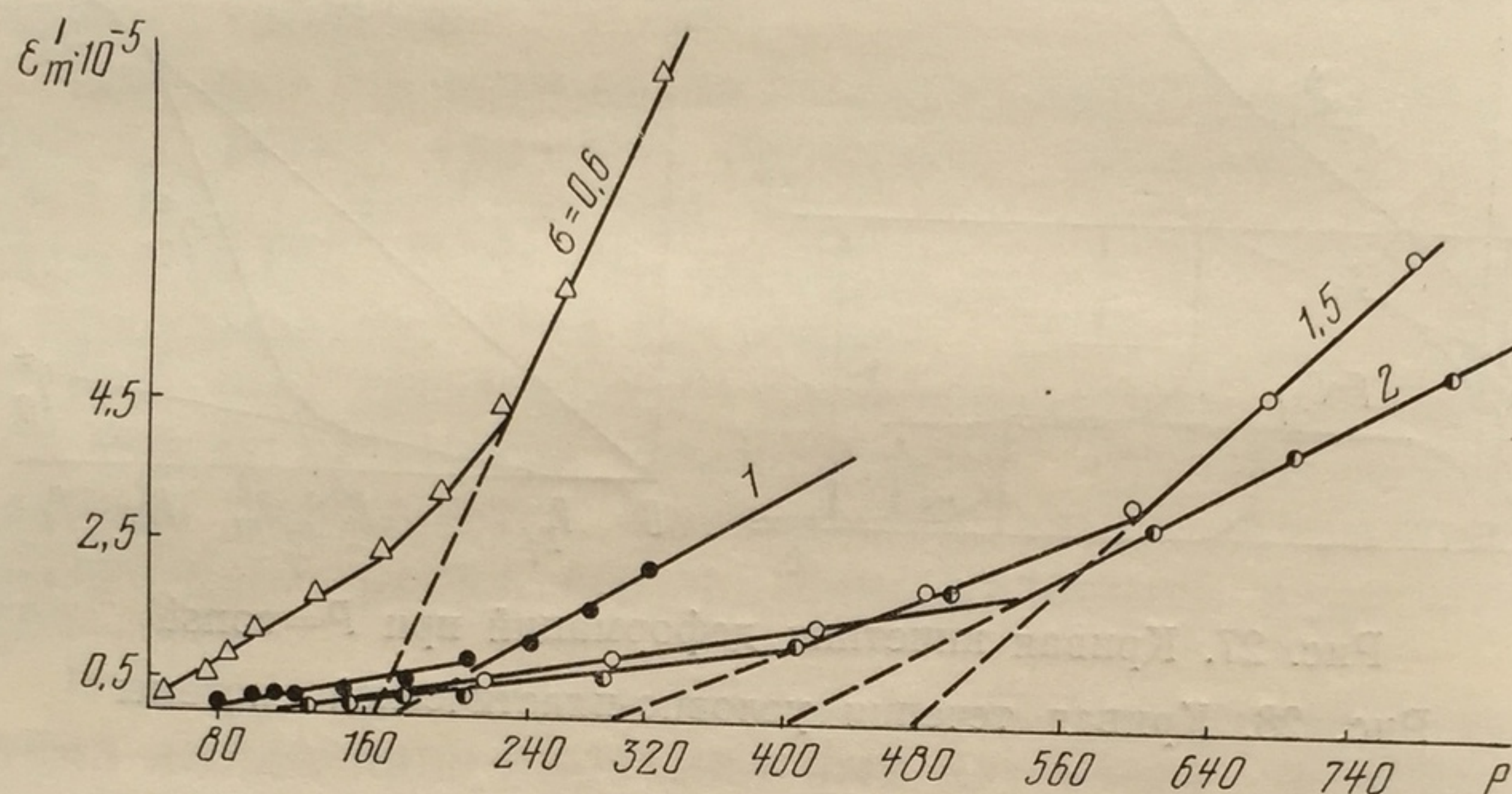


Рис. 30. Кривая течения ТЦО-II

гических характеристик P_k , $\eta_{пл}$ и модулей сдвига. С ростом давления пластичности ψ_1 и ψ_2 сначала уменьшаются, а затем возрастают (рис. 32). Наибольшая пластичность у ТЦО-II. Масса ТЦО-I повышает пластичность с ростом давления, а масса ТЦО-0 после давления $147 \times 10^3 \text{ Н/м}^2$ практически ее не изменяет. Поэтому при гранулировании массы ТЦО-I необходимо увеличить давление гранулирования, например толщину матрицы гранулятора.

Характер зависимости динамической пластичности от σ свидетельствует о том, что скорость формования (продавливания) может увеличить пластичность. Так, например, ТЦО-I в динамическом режиме течения имеет пластичность выше, чем ТЦО-II. Градиент скорости при постоянной линейной скорости может быть увеличен за счет уменьшения диаметра насадки или решетки. Следует обратить внимание, что движение массы через матрицу гранулятора происходит с различными скоростями.

Прочность
ния внутр
зу по цили
должно бы
да сдвиг н
участка п
ния, второ
чению мас

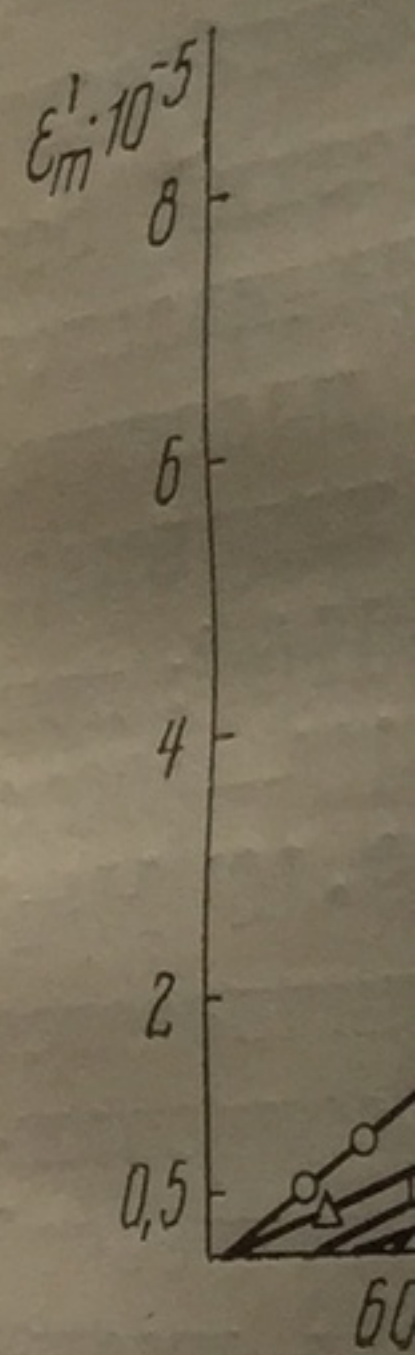


Рис. 32. Зависимость пластичности от давления

Прочность гранул может быть снижена из-за возрастания внутренних напряжений в массе, что приводит к срезу по цилиндрическим поверхностям. Исходя из этого, должно быть только два типа течения [75]: первый, когда сдвиг не распространяется на все сечения и движение участка происходит стержнем без признаков разрушения, второй, когда сдвиг распространяется по всему сечению массы, но срез слоев и их скольжение друг отно-

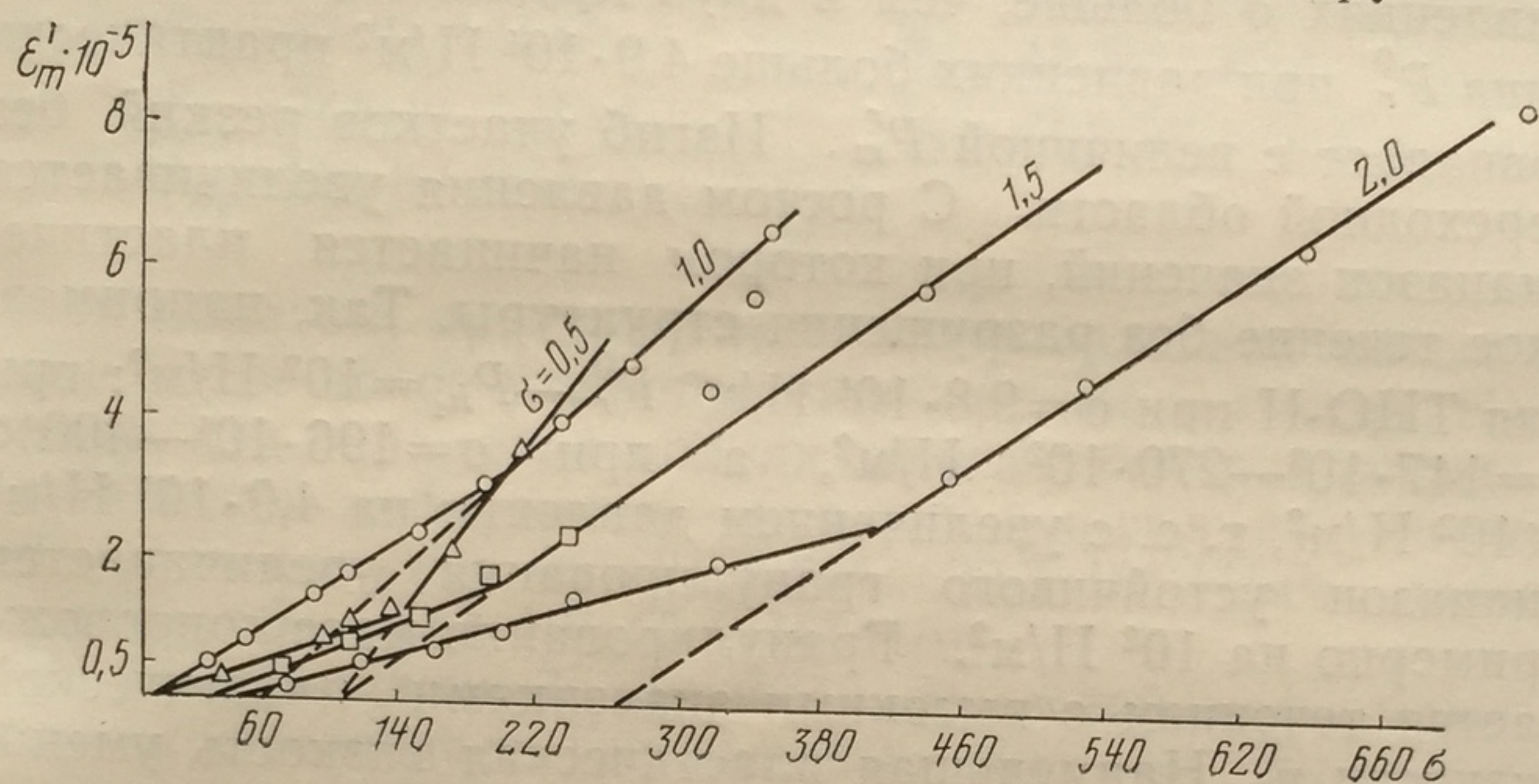


Рис. 31. Кривая течения тетрациклина-0

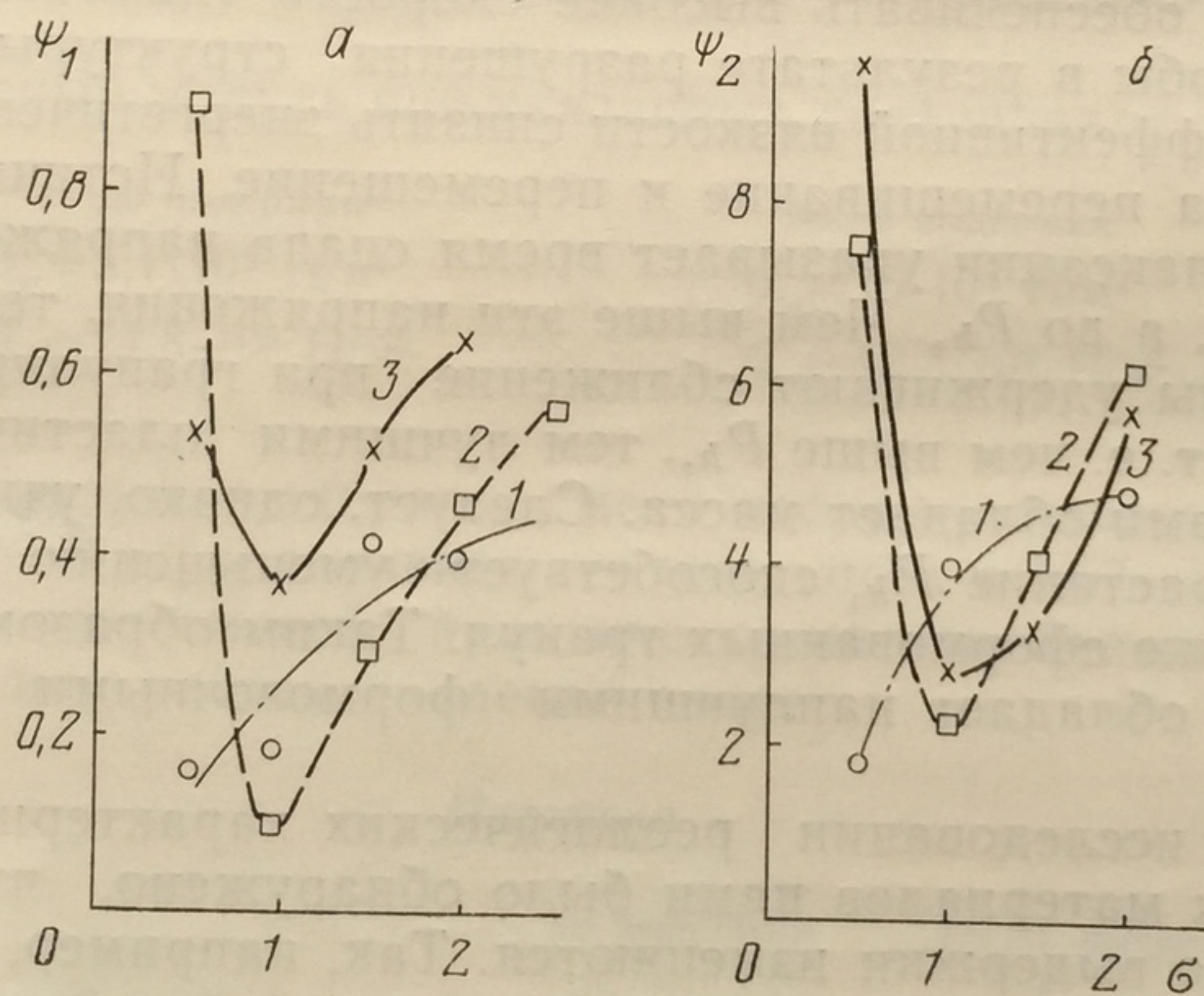


Рис. 32. Зависимость статической α и динамической β пластичности от напряжения сдвига: 1 — ТЦО-0; 2 — ТЦО-I; 3 — ТЦО-II

сительно друга не имеет места. Первый тип течения характеризуется условной границей течения практически неразрушающейся структуры P_r^0 . Для наиболее эффективного гранулирования выгодно иметь этот предел наибольшим. Для второго типа движения характерен участок разрушающейся структуры P_r^m .

Таким образом, значения P_r^0 для ТЦО-II при всех давлениях σ больше, чем в двух других случаях. Величина P_r^0 при давлениях больше $4,9 \cdot 10^4$ Н/м² практически совпадает с величиной P_r^m . Изгиб участков резкий, без переходной области. С ростом давления увеличивается диапазон значений, при котором начинается пластическое течение без разрушения структуры. Так, например, для ТЦО-II при $\sigma = 9,8 \cdot 10^4$ Н/м² $P_r^0 - P_{k_1} = 10^2$ Н/м²; при $\sigma = 147 \cdot 10^3 - 270 \cdot 10^2$ Н/м², а при $\sigma = 196 \cdot 10^4 - 400 \times 10^2$ Н/м², т. е. с увеличением давления на $4,9 \cdot 10^4$ Н/м² диапазон устойчивого гранулирования увеличивается примерно на 10^2 Н/м². Гранулирование масс сопровождается течением с высокими значениями пластической вязкости η_0 . Наименьшая пластическая вязкость уменьшается в 2—3 раза, а при более высоких напряжениях сдвига она должна снижаться еще больше. Следовательно, при транспортировке массы к гранулятору целесообразно обеспечивать высокие скорости (давление) для того, чтобы в результате разрушения структуры и снижения эффективной вязкости снизить энергетические затраты на перемешивание и перемещение. Истинный период релаксации указывает время спада напряжений не до нуля, а до P_{k_1} . Чем выше эти напряжения, тем большие силы удерживают сближение при гранулировании частиц, т. е. чем выше P_{k_1} , тем лучшими пластическими свойствами обладает масса. Следует, однако, учитывать, что возрастание P_{k_1} способствует уменьшению усадки при сушке сформованных гранул. Таким образом, масса ТЦО-II обладает наилучшими формовочными свойствами.

При исследовании реологических характеристик некоторых материалов нами было обнаружено, что они в процессе выдержки изменяются. Так, например, для пиррамеина предельное напряжение сдвига для массы, выдержанной в течение 1,5—2 ч, возрастает, и тем больше, чем больше давление:

при $\sigma = 39,2$ Н/м²
при $\sigma = 78,4$ Н/м²
при $\sigma = 118$ Н/м²

для тройчат

$P_{k_1} = 33 \cdot 10^2$
 $P_{k_1} = 37,6 \cdot 10^2$
 $P_{k_1} = 166 \cdot 10^2$

Таким образом, статическом поведении, например, для пиррамеина эластической деформации вид: до выдержки выдержки $G_0 = 3$

Модули медленности (модуль эластичности)

при $\sigma = 39,2$ Н/м²
при $\sigma = 78,4$ Н/м²

Равновесный модуль

до выдержки
 $G_m = 8,1 \cdot 10^2$
 $G_m = 24,8 \cdot 10^2$

Таким образом, течение 2—3 ч удерживается эластичностью с выдержкой, но с ростом

при $\sigma = 39,2$ Н/м²
при $\sigma = 78,4$ Н/м²
при $\sigma = 118$ Н/м²

	свежая	выдержанная
при $\sigma = 39,2 \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 13,3 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 17,7 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$
при $\sigma = 78,4 \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 59,9 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 104,9 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$
при $\sigma = 118 \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 88 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 161,4 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$

для тройчатки при тех же давлениях:

свежая	выдержанная
$P_{k_1} = 33 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 41 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$
$P_{k_1} = 37,6 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	$P_{k_1} = 74,2 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$
$P_{k_1} = 166 \cdot 10^{-2} \text{ Н/м}^2$	

Таким образом, при хранении приготовленной массы в статическом покое увеличивается жесткость смесей. Например, для пирамеина модули сдвига и быстрой высокоэластической деформации (модуль упругости) имеют вид: до выдержки $G_0 = 21,3 \cdot 10^2, 39,3 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$; после выдержки $G_0 = 39,3 \cdot 10^2, 65,4 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$.

Модули медленной высокоэластической деформации (модуль эластичности) приведены ниже:

	до выдержки	после выдержки
при $\sigma = 39,2 \text{ Н/м}^2$	$G_2 = 13,2 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$	$G_2 = 24,4 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$
при $\sigma = 78,4 \text{ Н/м}^2$	$G_2 = 65,8 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$	$G_2 = 121,6 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$

Равновесный модуль при указанных давлениях:

до выдержки	после выдержки
$G_M = 8,1 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$	$G_M = 15 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$
$G_M = 24,8 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$	$G_M = 42,5 \cdot 10^2 \text{ Н/м}^2$

Таким образом, выдержка смеси после приготовления в течение 2—3 ч увеличивает ее жесткость в 1,67—2 раза. Эластичность смесей практически не изменяется с выдержкой, но с ростом давления падает.

Пирамеин

	до выдержки	после выдержки
при $\sigma = 39,2 \text{ Н/м}^2$	$\lambda = 0,62$	$\lambda = 0,62$
при $\sigma = 78,4 \text{ Н/м}^2$	$\lambda = 0,37$	$\lambda = 0,35$
при $\sigma = 118 \text{ Н/м}^2$	$\lambda = 0,24$	$\lambda = 0,32$

Тройчатка (анальгин + амидопирин + кофеин бензоат натрия) при тех же давлениях:

до выдержки	после выдержки
$\lambda=0,58$	$\lambda=0,54$
$\lambda=0,44$	$\lambda=0,44$
$\lambda=0,2$	$\lambda=0,28$

Пластическая вязкость по Шведову (наибольшая пластическая вязкость) также изменяется со временем и с ростом давления увеличивается:

Пирамеин

до выдержки	после выдержки
$\eta_0^*=17,5 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\eta_0^*=24,5 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$
$\eta_0^*=45,2 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$	$\eta_0^*=75 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$
$\eta_0^*=113 \cdot 10^{-8} \text{ Па} \cdot \text{с}$	—

Пластичность системы, характеризующая легкость деформирования в процессах течения и термической обработки, практически не зависит от выдержки:

Пирамеин

до выдержки	после выдержки
$\psi_1=0,76 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	$\psi_1=0,72 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$
$\psi_1=1,32 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	$\psi_1=1,39 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$
$\psi_1=0,78 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$	—

Проведенные исследования показали, что таблеточные массы, приготовленные для сушки, термической обработки или для механического перемещения, не должны выдерживаться, так как реологические свойства системы со временем ухудшаются (возрастает величина предельного напряжения сдвига, что влечет за собой увеличение затрат мощности на начало течения; увеличивается жесткость смесей, вязкость, а значит, необходимы дополнительные затраты на процесс грануляции). Кроме того, такие массы сохнут медленнее, подвергаются усадке, разрушению и т. д. При грануляции и сушке следует регламентировать время приготовления смесей и время от приготовления до получения продукта. Необходима органическая, непрерывная связь процессов перемешивания, гранулирования и сушки.

Реологич
заранее и б
нахождении
ции изучить
характерист
которые фо
клеястера ил
зависимость
смешивания
фактора.

2.4. ИССЛЕДОВА ХАРАКТЕРИСТИК

Пр
сушки медиц
ванных режи
можны без зн
териала (теп
ропроводности
расчеты суши
температуру
чество термол
Теплофизи
ной степени с
пло- и массоп
в той или ин
сти, а теплом
баланса.

Теплофизи
фармацевтиче
ный расход т
При сушке на
до 95% всего
мощи от тепл
теплоты парс
жидкости.

Следует от
стики большин
ло, а зависимо
тически нет [4
Большинств
теплофизическ

Реологические характеристики должны определяться заранее и быть оптимальными. Поэтому очень важно при нахождении интенсивности процессов сушки и грануляции изучить структурно-механические и реологические характеристики этих материалов. Для таблеточных масс, которые формируются с добавлением крахмального клейстера или другого связующего, необходимо знать зависимость реологических характеристик от времени смешивания и оптимальные значения с учетом этого фактора.

2.4. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Правильное понимание механизма процесса сушки медицинских препаратов и выбор научно обоснованных режимов работы сушильных установок невозможны без знания теплофизических характеристик материала (теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности), без них нельзя производить тепловые расчеты сушильных установок, правильно определять температуру нагрева при сушке, от которой зависит качество термолабильных материалов.

Теплофизические свойства материалов в значительной степени определяют закономерность внутреннего тепло- и массопереноса при термической обработке, входят в той или иной комбинации в уравнение теплопроводности, а теплоемкость, кроме того, в уравнение теплового баланса.

Теплофизические характеристики влажных химико-фармацевтических препаратов сильно влияют на удельный расход тепла на единицу высушенного продукта. При сушке на нагрев массы материала расходуется от 3 до 95% всего затрачиваемого на сушку тепла в зависимости от теплоемкости, начальной влажности, скрытой теплоты парообразования, теплоемкости испаряемой жидкости.

Следует отметить, что теплофизические характеристики большинства медицинских препаратов изучены мало, а зависимостей их от влажности и температуры практически нет [44, 45, 78].

Большинство существующих методов определения теплофизических характеристик основано на решениях

линейного и одномерного дифференциальных уравнений теплопроводности. Проведение эксперимента при малых температурных перепадах (менее 10°C) дает возможность без значительной погрешности использовать расчетные соотношения, полученные из решений линейного уравнения [80]. Для определения зависимости теплофизических свойств от температуры применяют метод последовательного термостатирования или непрерывного нагрева испытуемого материала. Первый метод требует чрезвычайно больших затрат времени, так как необходимо термостатировать образец при заданной температуре и затем создавать в нем малое температурное возмущение, например, с помощью внутреннего источника постоянной мощности. Эта операция должна повторяться столько раз, сколько «точек» нужно получить в интересующем нас температурном диапазоне.

С целью повышения эффективности исследований нами использован метод непрерывного нагрева материала постоянным тепловым потоком (граничное условие второго рода).

Изменение температуры в неограниченной пластине, неограниченном цилиндре и шаре при симметричном нагреве этих тел постоянным тепловым потоком может быть записано в виде [78, 80]

$$T(r, \tau) - T_0 = \frac{qR}{\lambda} \left[\Gamma \frac{d\tau}{R^2} - \frac{\Gamma}{2(\Gamma + 2)} + \frac{1}{2} \frac{r^2}{R^2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp \left(-\mu_n^2 \frac{d\tau}{R^2} \right) \right]. \quad (3)$$

В случае неограниченной пластины $r=x$. Величина $\Gamma = 1, 2, 3$ — соответственно для неограниченной пластины, неограниченного цилиндра и шара. Значения A и $\Phi \left(\mu_n \frac{r}{R} \right)$ приведены в [80]. Для перечисленных выше тел (в той же последовательности) эти значения находятся из следующих характеристических уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \mu &= n\pi, \\ J_1(\mu) &= 0, \\ \operatorname{tg} \mu &= \mu. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

В критериальной
сать так:

$$\frac{\theta}{Ki} = \Gamma$$

$$+ \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi \left(\mu_n \right)$$

$$\text{где } Ki = \frac{qR}{\lambda T_0}$$

В квазистаци
но представить в

$$\frac{\theta}{Ki} =$$

Для неограниче
ностью до 0,1%

Используя в
вычисления теп.

где $\Delta T = T(r_2, \tau)$
ду какими-либо
менты времени

На основании

Сравнивая
выражение д
водности

5. За

В критериальной форме уравнение (3) можно переписать так:

$$\frac{\theta}{Ki} = \Gamma Fo - \frac{\Gamma}{2(\Gamma + 2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \Phi \left(\mu_n \frac{r}{R} \right) \exp(-\mu_n^2 Fo) = f \left(\frac{r}{R}, Fo \right), \quad (5)$$

где $Ki = \frac{qR}{\lambda T_0}$ — критерий Кирпичева.

В квазистационарном режиме соотношение (5) можно представить в виде

$$\frac{\theta}{Ki} = \Gamma Fo - \frac{\Gamma}{2(\Gamma + 2)} + \frac{1}{2} \left(\frac{r}{R} \right)^2. \quad (6)$$

Для неограниченного цилиндра уравнение (6) с точностью до 0,1% справедливо уже при $Fo = 0,21$.

Используя выражение (6), получаем формулу для вычисления теплофизических характеристик

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T} \left(\frac{r_2^2 - r_1^2}{R^2} \right), \quad (7)$$

где $\Delta T = T(r_2, \tau) - T(r_1, \tau)$ — разность температур между какими-либо двумя точками тела в одни и те же моменты времени. Если $r_2 = R_2$ и $r_1 = 0$, то

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T}. \quad (8)$$

На основании уравнения (6)

$$b = \frac{dT(r, \tau)}{d\tau} = \frac{aq\Gamma}{\lambda R} = \text{const.} \quad (9)$$

Сравнивая уравнение (7) с уравнением (9), находим выражение для расчета коэффициента температуропроводности

$$a = -\frac{b}{2\Gamma\Delta T} (r_2^2 - r_1^2), \quad (10)$$

или

$$a = \frac{r_2^2 - r_1^2}{2\Gamma\Delta\tau}, \quad (11)$$

где τ — время запаздывания.

Предполагаемое знание теплового потока и характер изменения температуры в квазистационарном режиме позволяют найти удельную теплоемкость непосредственно из соотношения, определяющего эту величину:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} = \frac{q}{b\rho R}, \quad (12)$$

или

$$c = \frac{\lambda}{a\rho}. \quad (13)$$

Таким образом, возможны одновременное и независимое определение теплофизических характеристик и проверка результатов на основе выражений (12), (13).

Приведенные выше формулы справедливы для тел неограниченных размеров.

С целью обоснования метода для ограниченных цилиндра и параллелепипеда нами рассмотрены и проанализированы соответствующие двумерные задачи теплопроводности. Если ввести параметр, характеризующий относительную высоту цилиндра $K=h/R$, где h — полувисота; R — радиус, то из двумерного решения для ограниченного цилиндра вытекают формулы, отличающиеся от (7), (8) численным коэффициентом:

для $K=3$

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T} 0,9984, \quad (14)$$

для $K=1$

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T} 0,8024, \quad (15)$$

для $K=1/4$

$$\lambda = \frac{qR}{2\Delta T} 0,9856. \quad (16)$$

Сравнение выражения (14) с (8) позволяет сделать вывод, что при $K=3$, т. е., когда высота цилиндра втрое

больше его
практически
При соот
линейными
(13) можн
Блок-сх
на рис. 33.

Рис. 33. Блок-с
ка; 3 — защит
лодной воды; 6
0,5; 9 — внутре

Испытуем
лочку калор
нагреватель
УИП-1. При
ла сигнал на
ры, благодар
тора РНО-25
оболочки.

Таким обр
мента между
пературный п
тронной сист

больше его диаметра, неоднородность теплового потока практически не сказывается.

При соответствующем выборе соотношений между линейными размерами образца применение формул (7) — (13) можно считать полностью обоснованным [80].

Блок-схема экспериментальной установки приведена на рис. 33. Методика эксперимента следующая.

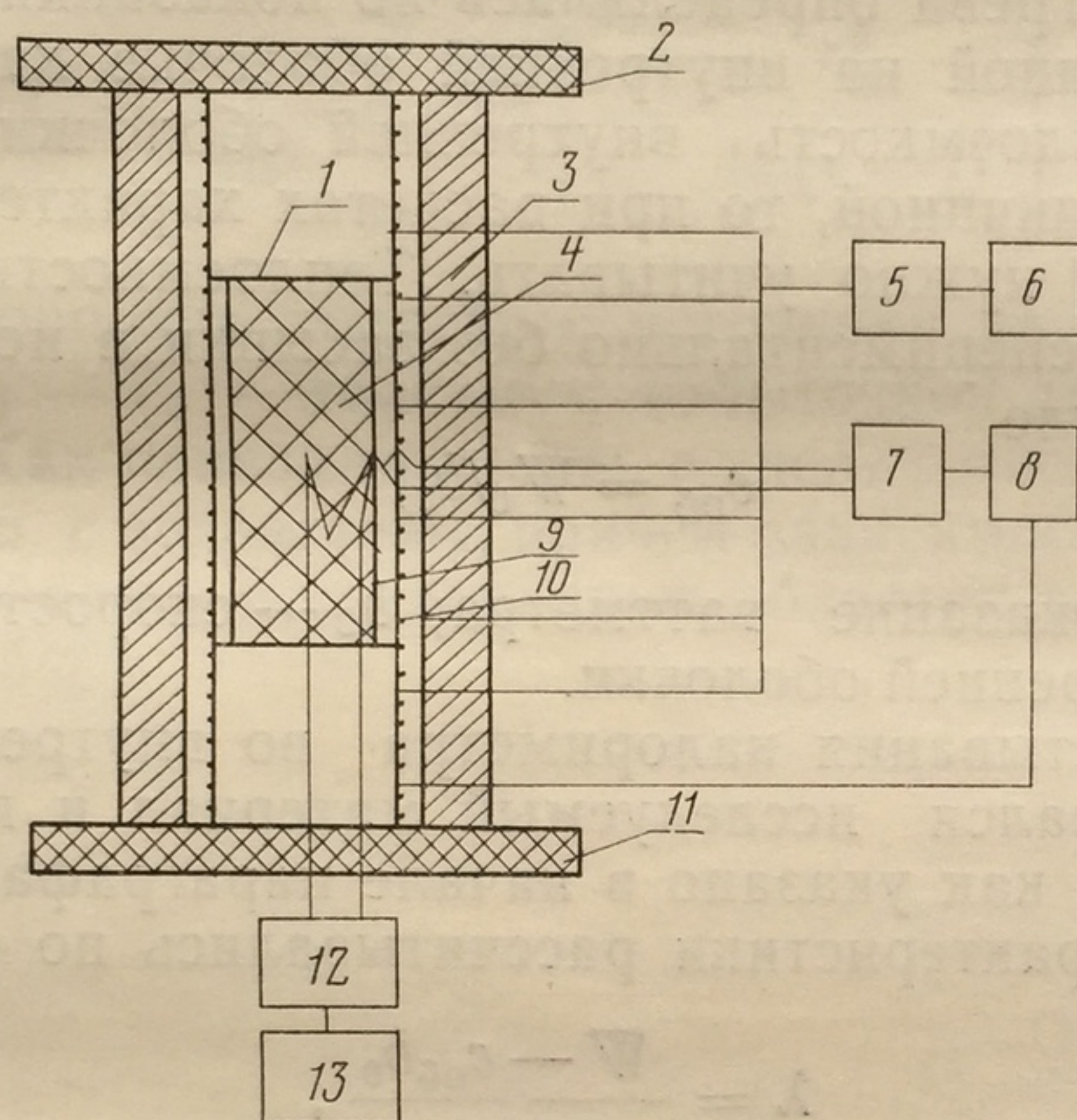


Рис. 33. Блок-схема экспериментальной установки: 1, 2, 11 — крышка; 3 — защитный кожух; 4 — испытуемый материал; 5 — блок холодной воды; 6 — ЭПП-09; 7 — регулятор температуры; 8 — РНО-250-0,5; 9 — внутренняя оболочка; 10 — защитная оболочка; 12 — Ф 359; 13 — самопишущий миллиамперметр

Испытуемый материал засыпался во внутреннюю оболочку калориметра. После сборки калориметра на его нагреватель подавалось напряжение от источника УИП-1. При этом дифференциальная термопара подавала сигнал на вход электронного регулятора температуры, благодаря чему приводился во вращение вал вариатора РНО-250—0,5, питающего нагреватель защитной оболочки.

Таким образом, непрерывно в процессе всего эксперимента между оболочками поддерживался нулевой температурный перепад в пределах чувствительности электронной системы. Выполнялась основная теоретическая

предпосылка метода — создавался постоянный тепловой поток на поверхности образца.

Разность температур между центром и поверхностью образца записывалась на ленте самописца, а температурное поле — на ленте ЭПП-09. Поскольку в обоих случаях лента движется с одинаковой скоростью, то сопоставление записей (по времени) не представляло трудностей. Скорость нагрева определялась по показаниям термопары, помещенной на внутренней оболочке калориметра. Так как теплоемкость внутренней оболочки является конечной величиной, то при расчетах характеристик материалов ее нужно учитывать. Теплоемкость оболочки получали экспериментально без засыпки в нее материала по формуле

$$c_{об} = W_0/b_0, \quad (17)$$

где W_0 — показание ваттметра; b_0 — скорость нагрева пустой внутренней оболочки.

После остывания калориметра во внутреннюю оболочку засыпался исследуемый материал и проводился эксперимент как указано в начале параграфа. Теплофизические характеристики рассчитывались по формулам:

$$\lambda = \frac{W - c_{об}b_0}{4\pi 2h\Delta T}, \quad (18)$$

$$\alpha = \frac{bR^2}{4\Delta T}, \quad (19)$$

$$c = \frac{W - c_{об}b_0}{bm}, \quad (20)$$

где W — показание ваттметра; b — скорость нагрева; $2h$ — длина нагревателя внутренней оболочки; R — внутренний радиус внутренней оболочки; m — масса испытуемого материала.

Кроме того, теплоемкость испытуемого материала можно определить и из соотношения (13). Как видно из табл. 5 приложения 1, теплофизические характеристики большинства исследуемых химико-фармацевтических препаратов при изменении температуры от 15 до 90 °C практически не зависят от температуры.

Исследование теплофизических свойств химико-фар-

мацевтических материалов в зависимости от влагосодержания выполнялось методом импульсного линейного источника тепла. Этот метод основывается на решении двумерного уравнения теплопроводности для неограниченного тела в случае действия в нем кратковременного источника тепла длительностью τ_0 .

Это решение имеет вид

$$T(r_0\tau) - T_0 = \frac{q}{4\pi\lambda} \int_0^{\tau_0} \exp\left[-\frac{r_0^2}{4a(\tau-t)}\right] \frac{dt}{(\tau-t)}, \quad (21)$$

где q — мощность теплового источника на единицу длины; $T(r_0\tau) - T_0$ — максимум избыточной температуры в точке r_0 . Как показали опыты, с увеличением влагосодержания λ , a , c возрастают, причем зависимость λ и c близка к линейной в исследованных областях влагосодержания (6—15%).

МЕХАНИЗМ И ОСОБЕННОСТИ СУШКИ ДИСПЕРСНЫХ ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕТОДОВ

3.1. ОТЛИЧИТЕЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ И ПРЕИМУЩЕСТВА НОВЫХ МЕТОДОВ СУШКИ

В медицинской промышленности процессы тепло- и массообмена достаточно широко распространены (сушка, выпарка, нагрев и т. д.). Однако, как было показано ранее, осуществляются они на устаревшем оборудовании, малоинтенсивны и не отвечают современным требованиям производства.

Процесс сушки в медицинской промышленности до сих пор производится малоэффективными методами с широким использованием ручного труда. Задача создания высокоинтенсивных аппаратов для сушки медицинских препаратов актуальна и требует скорейшего разрешения.

Для выявления наиболее эффективного и перспективного метода сушки были определены основные требования производства и особенности его, которые позволили сделать следующие обобщения:

1) эффективность и перспективность метода в данном случае определяется возможностью использования для сушки большинства лекарственных препаратов однотипного аппарата, который должен быть создан с учетом свойств материалов как объектов сушки, а также осуществления органической увязки технологических процессов до и после сушки и высокоинтенсивного тепло- и массообмена;

2) рациональный технологический режим сушки для целого ряда препаратов может быть выполнен только при организации такого процесса, который обеспечит гибкую регулировку процессов сушки и гранулирования,

сочетание процессов перемешивания, грануляции и сушки, минимальные потери материала на всех стадиях процесса.

В ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР были проведены исследования процесса сушки лекарственных масс, предназначенных для таблетирования, в пневмотрубе, во взвешенном и в кипящем слоях. Несмотря на значительную интенсификацию процесса, указанные методы нельзя считать наиболее перспективными, так как они не обеспечивают доброкачества продукта. Сушка в этих случаях сопровождается измельчением, сегрегацией частиц, большим уносом, что приводит к получению нестандартных таблеток и значительной потере материала.

Применение псевдоожиженного слоя для ряда новых процессов выявило некоторые его недостатки: ограниченную возможность интенсификации процесса при подводе тепла только с газом, недостаточно активный гидродинамический режим. Это привело, с одной стороны, к развитию ряда модификаций метода псевдоожижения, фонтанирующему и вихревому слою, с другой — к созданию комбинированных методов, сочетающих различные гидродинамические режимы и методы подвода тепла в кипящий слой.

Примером первого направления в медицинской промышленности могут служить сушилки с пульсирующим слоем, применяемые при сушке антибиотиков. Использование этих сушилок приводит к интенсификации процесса сушки, улучшению условий труда, но не позволяет высушивать вязкие материалы, решать вопросы поточности производства, непрерывности процесса сушки. Одним из вариантов второго направления является использование комбинированного метода сушки [81, 82]. Сущность метода состоит в том, что процесс испарения жидкости из материала происходит в свободно-падающем и кипящем слое при организованно-распределенной подаче сушимого материала. В зависимости от требований, предъявляемых к готовому продукту, рыхлая подача материала осуществляется через жесткое или мягкое гранулирование, или просто через просеивание на зеркало кипящего слоя.

С помощью комбинированного метода сушки осуществляются объединение двух разрозненных процессов (влажного принудительного гранулирования и сушки в

одном аппарате); комбинированное испарение жидкости в падающем и кипящем слое; сочетание сушки с предварительной очисткой отходящих газов; способ подачи, обеспечивающий успешное течение процесса ожижения и сушки даже высоковязких материалов; создание на его основе поточного производства и новой технологии таблетирования лекарственных и витаминных препаратов.

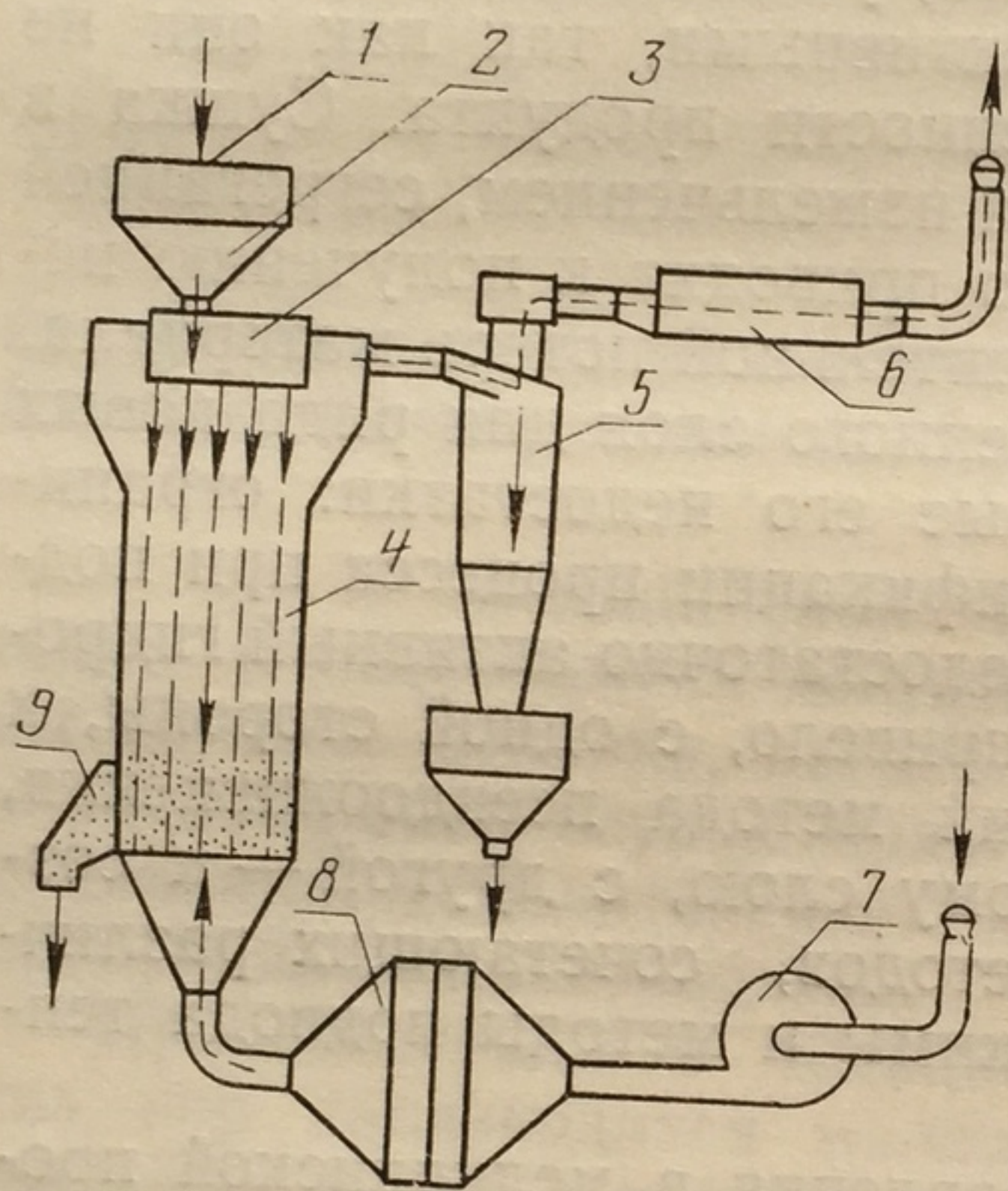


Рис. 34. Схема комбинированной сушильной установки системы ИТМО АН БССР: 1 — подача материала в бункер; 2 — бункер; 3 — гранулятор; 4 — сушильная камера; 5 — циклон; 6 — фильтр; 7 — вентилятор; 8 — калорифер; 9 — выгрузочное устройство

Отметим, что предложенный комбинированный метод сушки, объединяющий разные гидродинамические условия теплообмена (падающий и кипящий слой) и процесс испарения, может быть проведен различными способами, отличающимися условиями подачи и конструктивными элементами, организующими то или иное распределение массы поступающего материала по поверхности кипящего слоя. Таким образом, для различных материалов применяется тот же метод, а способ определяется физико-химическими и реологическими свойствами материалов. Рассмотрим особенности предлагаемого метода и вытекающие из них преимущества. Материал 1, предназначенный для сушки подъемником любой конструкции или самотеком, попадает в бункер 2, который вмонтирован в гранулятор-просеиватель 3 (рис. 34). На этой стадии происходит объединение разрозненных процессов влажного гранулирования и подачи материала в сушильную

камеру. Это необходимо для того, чтобы получить материал с неизменными, оптимальными реологическими свойствами. Обычно, например, для таблетлируемых препаратов смешение происходит отдельно и материал из смесителя переносится в гранулятор, а затем в сушильную камеру. Такая последовательность приводит к тому, что гранулы при пересыпании и переноске разрушаются, иногда происходит их агрегация, изменяется фракционный состав материала. Особенно важно то, что в этом случае для большинства кристаллоколлоидных масс реологические характеристики не остаются постоянными. Все это способствует тому, что сушке подвергаются нестабильные по своим структурно-механическим и реологическим свойствам материалы, которые дают нестандартный сухой продукт.

Материал из бункера с помощью особого приспособления попадает под продавливающий орган гранулятора и формуется в гранулы, продавливаясь через матрицу-сетку, они падают по всему сечению суженной части сушильной камеры 4. Таким образом, подача осуществляется рассредоточенно.

Объединение ранее разрозненных процессов в одном аппарате позволяет сократить цикл производства, улучшить санитарные условия труда, повысить возможность управления процессом и качеством получаемого сухого продукта.

Сушка осуществляется в две стадии: в падающем слое, когда навстречу гранулам движется поток газового теплоносителя, и в кипящем слое. В данном случае выполняется конвективный подвод тепла при комбинированной гидродинамике, т. е. в падающем и псевдооживленном слоях. Падая в вертикальной части сушильной камеры, гранулы не только подсыхают и закрепляются, но и являются естественным фильтром для более мелких частиц, увлекаемых воздухом из кипящего слоя.

Предложенная комбинация позволяет сохранить форму гранул или кристаллов, избежать их измельчения и снизить процент уноса. Для трудносохнувших материалов кипящий слой организуется на двух решетках, расположенных ярусами. Материал с первой, считая сверху, решетки по переточной трубе поступает на вторую, где происходит сушка воздухом, который является для кипящего слоя и оживающим агентом (рис. 35).

Равномерное распределение сушимого материала по сечению вертикальной части сушильной камеры способствует подсушке материала в свободно-падающем слое без нарушения структуры материала, так как уменьшается соударение частиц друг с другом и со стенками аппарата. Отсутствует зона неустановившегося режима, так называемый разгонный участок, что определяет «спокойную» гидродинамическую обстановку в верти-

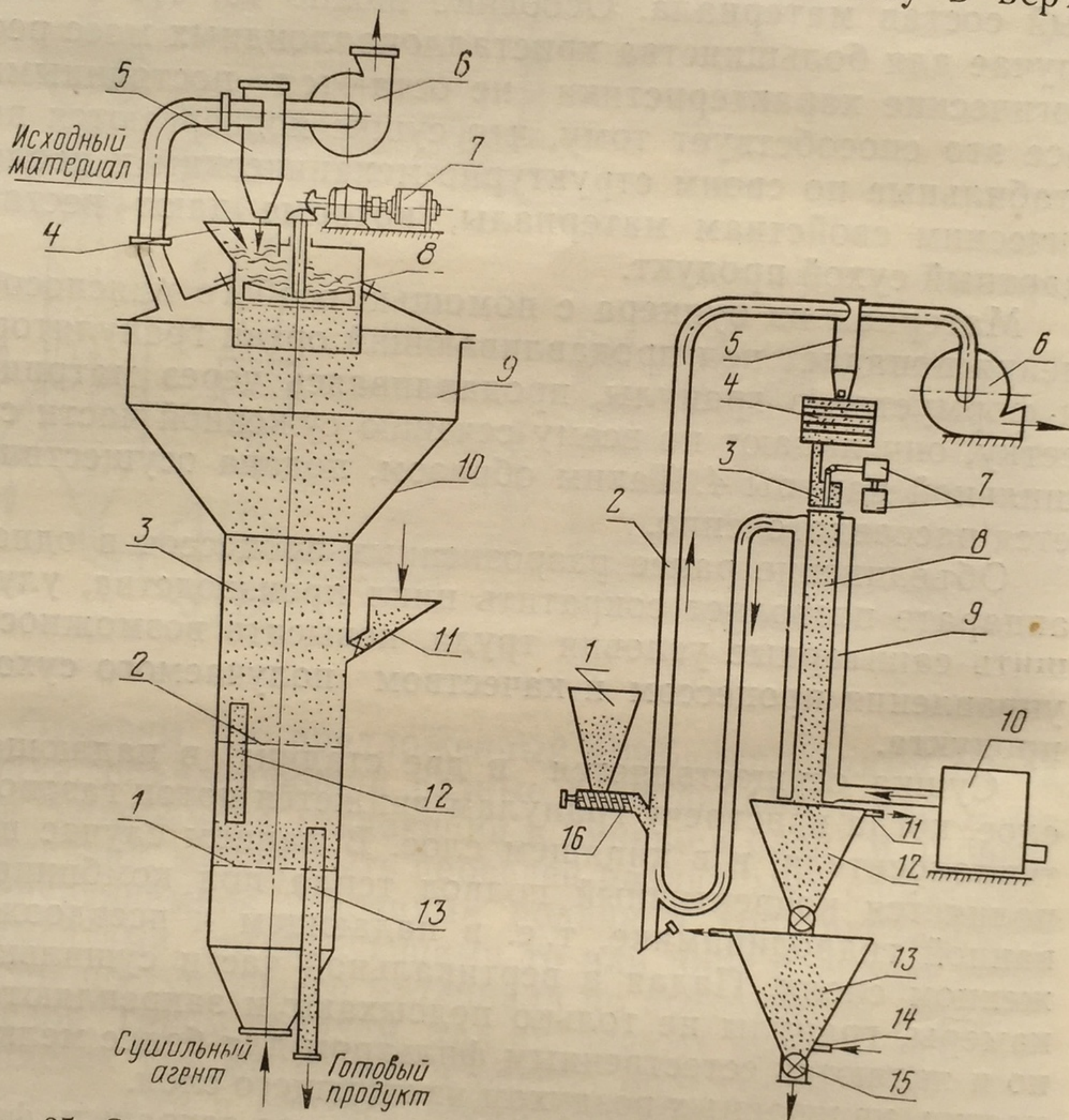


Рис. 35. Схема сушильной установки системы ИТМО АН БССР для трудносохнувших материалов: 1 — первая удерживающая решетка; 2 — вторая удерживающая решетка; 3 — вертикальная часть сушильной камеры; 4 — бункер для влажного материала; 5 — циклон; 6 — вентилятор; 7 — электромотор; 8 — гранулятор; 9, 10 — сепарационное пространство; 11 — устройство для засыпки сухих гранул; 12, 13 — переточные трубы

Рис. 36. Схема комбинированного нагрева и термической обработки дисперсных материалов при радиационном обогреве в падающем слое

кальной части сушилки и сохранение поверхности кристаллов. Предварительный нагрев материала в вертикальной части сушильной камеры позволяет провести основной процесс сушки в кипящем слое при «мягких» режимах.

Предлагаемый метод осуществляется при непрерывной подаче материала и непрерывной выгрузке сухого продукта, а значит, имеются все преимущества, перечисленные выше.

Исследование тепломассопереноса в падающем слое доказало его преимущества для случаев термообработки материалов невысокого влагосодержания и ограниченную возможность конвективного подвода тепла к падающим частицам. Для ликвидации этого недостатка и возможности сушки высоковлажных материалов был предложен комбинированный метод подвода, в основу которого положено сочетание лучистого и конвективного подвода тепла к сушиму материалу. Радиационная энергия передается от обогреваемых снаружи стенок вертикальной части сушильной камеры.

Во время падения гранулы воспринимают поток тепла от стенок и воздуха. В этом случае комбинированный подвод тепла позволяет наиболее эффективно использовать особенности переноса лучистой энергии в слабозапыленных потоках.

Радиационная обработка интенсифицирует обезвоживание материала за счет значительного увеличения плотности теплового потока на поверхности материала (например, по данным П. Д. Лебедева, плотность теплового потока увеличивается в 30 раз по сравнению с конвекцией), проникновение ИК-излучения на некоторую глубину существенно влияет на распределение в материале полей температуры и влажности и позволяет произвести термообработку без нарушения структуры материала и повысить его биологическую активность.

Комбинированный радиационно-конвективный подвод тепла может быть осуществлен в сушилке с падающе-кипящим слоем той же конструкции (см. рис. 34) — отличие составляет только внешний обогрев вертикальной части. Подобная комбинация применима для тех случаев, когда материал может быть обработан воздухом. Если соприкосновение материалов с воздухом нежелательно или просто недопустимо, используется метод сушки или

термической обработки в падающем слое при наружном обогреве [83—92].

Исходный влажный материал из бункера 1 питателем 16 подается в пневмотрубу 2, в которой происходит предварительный нагрев материала и его транспортировка с помощью воздуха, засасываемого вентилятором 6. В циклоне 5 газы отделяются от материала и выбрасываются в атмосферу, а материал поступает в бункер 4, вместо которого для крупных кусков используется дробилка. Из бункера 4 материал направляется в питатель 3, представляющий собой короткий цилиндр диаметром, равным диаметру трубы реактора. Днище питателя представляет собой сетку-матрицу, по которой вращается ворошитель-просеиватель, приводимый в движение мотором 7. Материал распределяется по всему сечению сушилки 8 (рис. 36). Стенки трубы-сушилки обогреваются снаружи горячими газами или воздухом, которые засасываются в межтрубное пространство 9, а затем направляются в пневмотрубу. Газы или воздух нагреваются в калориферной установке 10. Высушенный материал собирается в бункер 12, а паровоздушная смесь удаляется через патрубок 11. Для охлаждения материала, которое иногда требуется по технологии, предусмотрен бункер 13 с водяным охлаждением 14. Выгрузка материала происходит непрерывно через турникет 15.

Основные преимущества метода следующие:

- 1) снижается унос, так как теплообменный аппарат работает как осадительная камера, а небольшие скорости движения газовой фазы не приводят к значительному увлечению мелких частиц из аппарата; важное значение это имеет для случая нагрева дорогостоящих, токсичных и взрывоопасных материалов;
- 2) весьма незначительно измельчение материала в аппарате и нарушение поверхностной структуры материала;
- 3) небольшой расход энергии на процесс нагрева.

Особое значение приобретает этот метод для тех случаев, когда недопустим непосредственный контакт дисперсного материала с газовым теплоносителем высокой температуры или когда предъявляются высокие требования к чистоте нагреваемого материала [84, 88].

Для высоковлажных пастообразных материалов, содержащих около 80—90% жидкости, применение опи-

санны
Поэто
механи
нами
фика
дуктив
[92].

Рис. 37. Схе
ИТ

ется в гра
часть суши
нулятор од
виде враща
электроэнер
ются кругов
ней части б
удаления по
ные кусочки
сушилки, ко
позволяет с

санных выше методов не дает положительного эффекта. Поэтому для материалов, которые изменяют в процессе механической обработки свои тиксотропные свойства, нами был предложен метод, используемый для интенсификации процесса нагрева и сушки, сочетающий кондуктивный, радиационный и конвективный подвод тепла [92]. Вначале пастообразный материал самотеком пода-

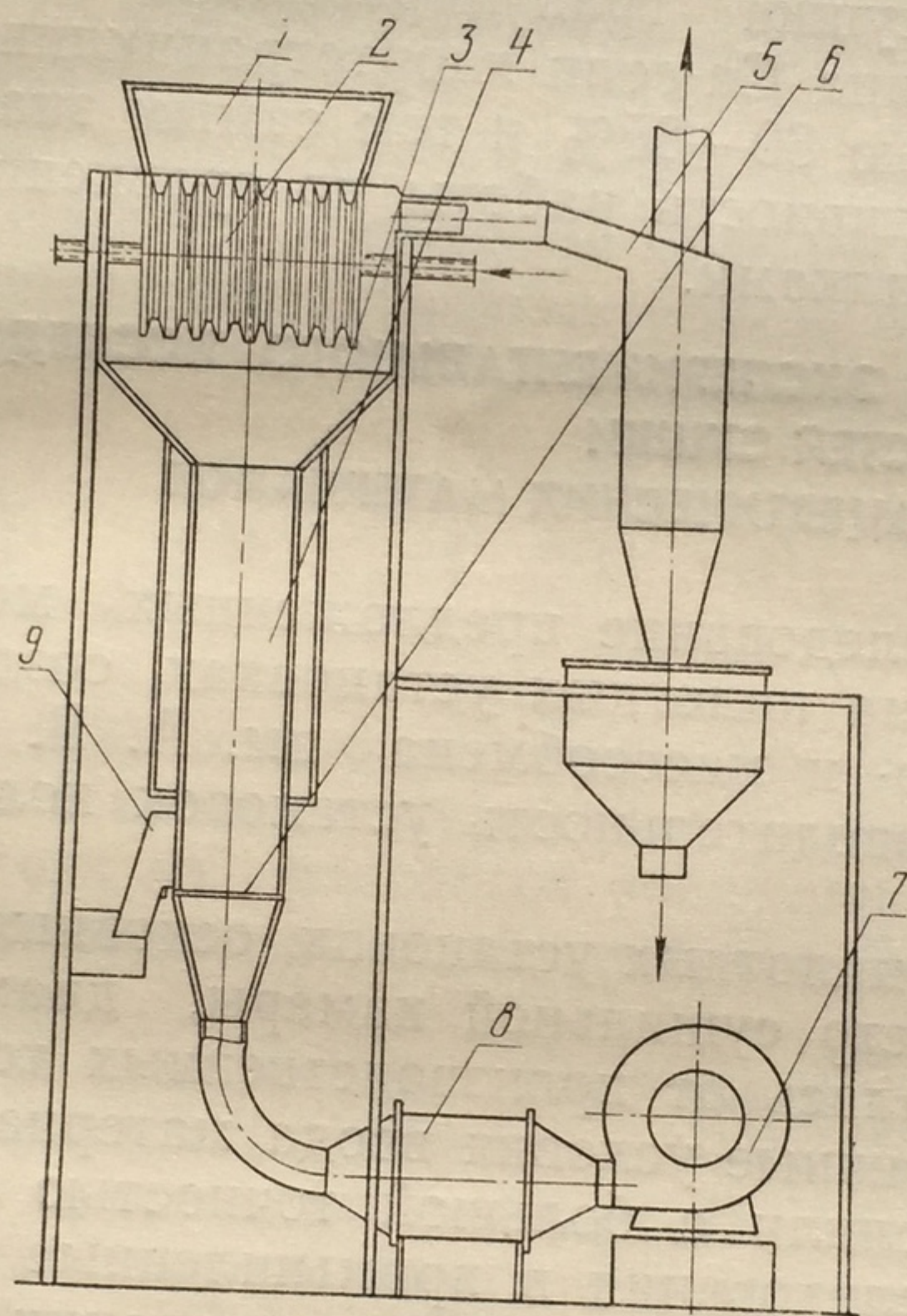


Рис. 37. Схема комбинированной сушильной установки системы ИТМО АН БССР для пастообразных материалов

ется в гранулятор, который вмонтирован в верхнюю часть сушильной сепарационной камеры (рис. 37). Гранулятор одновременно является сушилкой и выполнен в виде вращающегося барабана, обогреваемого паром или электроэнергией. На внешней поверхности барабана имеются круговые канавки трапецевидной формы. В нижней части барабана установлен скребок-гребенка для удаления подсохшей массы и ее дробления. Образованные кусочки материала падают в вертикальной части сушилки, которая имеет наружный обогрев. Этот метод позволяет с помощью кондуктивного подвода тепла в

первой ступени подсушить материал и сформовать его в кусочки размером 4—8 мм. Кусочки материала, падая в вертикальную часть сушильной камеры, подвергаются воздействию лучистого потока от нагретых стенок и воздуха, движущегося навстречу падающим гранулам.

Данную установку можно применить, например, для непрерывной сушки гранулированных пастообразных препаратов (типа Са-соли хлортетрациклина) с начальной влажностью 80—85% и тем самым значительно повысить эффективность работы по сравнению с существующими сушилками.

3.2. МЕТОДИКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ СУШКИ ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Исследование предложенных методов сушки проводилось на пилотных установках, созданных в Институте тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова АН БССР. Производительность установок колебалась от 2 до 30 кг/ч.

Создание пилотных установок, основные размеры которых (диаметр сушильной камеры, диаметр гранулятора) отличались от производственных только в 2—3 раза и идентичные условия ввода материала и теплоносителя позволили с большой точностью перенести результаты исследования в промышленные условия.

При экспериментальном исследовании учитывалось то, что кинетическое уравнение сушки $w=f(\tau)$, полученное при периодическом процессе, некорректно использовать для непрерывных производственных процессов. Поэтому эксперименты проводились при непрерывном процессе с мечеными частицами, которые вбрасывались в слой в виде небольшой порции. Следуя [93], методика снятия кривых сушки с помощью меченых частиц состояла в следующем: в слой при непрерывной работе сушилки вбрасывалась порция подкрашенного материала определенной влажности с исходным, а затем периодически через короткие интервалы (0,5—5 мин) отбирались пробы, из которых отделялись подкрашенные частички для анализа на влажность. Метод этот достаточно удобен, однако может приводить к ошибкам и неточностям из-за

несовершенной методики определения влагосодержания тензометрическим методом с применением сушильного шкафа.

Поэтому нами был разработан и использован метод определения влагосодержания спектральным отражением [94, 95]. Сущность метода в том, что сравнивается интенсивность спектрального отражения на частоте деформационных колебаний воды, т. е. там, где она сильно поглощает, и на соседнем участке, где полосы поглощения отсутствуют.

С помощью такого метода можно очень быстро отобрать 2—4 окрашенные гранулы (или частицы) и измерить коэффициент отражения материала в относительно узкой области спектра, а значит, определить ω по уравнению

$$\left(\frac{K}{S}\right)_{\text{вл.м}} = \omega \left(\frac{K}{S}\right)_{\text{в}} + (1 - \omega) \left(\frac{K}{S}\right)_{\text{с.м}}. \quad (22)$$

Соотношение (22) означает аддитивность отношения констант воды и сухого материала, т. е. поглощение при 1610 см^{-1} состоит из «фоновое» поглощения сухого материала и дополнительного, обусловленного присутствием влаги.

Константа S — величина, зависящая от влажности, однако для достаточно широкого диапазона изменений ω может быть принята постоянной. По значению R_{∞} на частоте 1610 см^{-1} определяются K/S влажного материала, а по спектральной кривой коэффициента отражения на частоте сравнения — второе слагаемое в правой части соотношения (22).

Измеряя коэффициент отражения материалов с различной влажностью в относительно узкой области спектра, находим ω по приведенному выше уравнению. Так как измерение проводится один раз, исключаются различия в структуре поверхности и плотности упаковки, а также между инструментальными факторами (чувствительностью приемника и др.). Определение проводилось спектрофотометром UR-20 со специальными отражательными устройствами. Время производства анализа в среднем 15 мин. Незначительность ошибок позволила получить стабильные результаты, оценить процессы удаления влаги при вбрасывании окрашенных порций материала в зависимости от различных факторов.

Для ряда материалов исследование процесса сушки происходило на основе снятия кривых по среднеинтегральной влажности. Для экспериментов использовали пилотную установку непрерывного действия (рис. 38) производительностью от 1 до 30 кг/ч [96, 97]. Установка состояла из сушильной камеры, выполненной в виде цилиндрической трубы, и конусной расширенной сепараци-

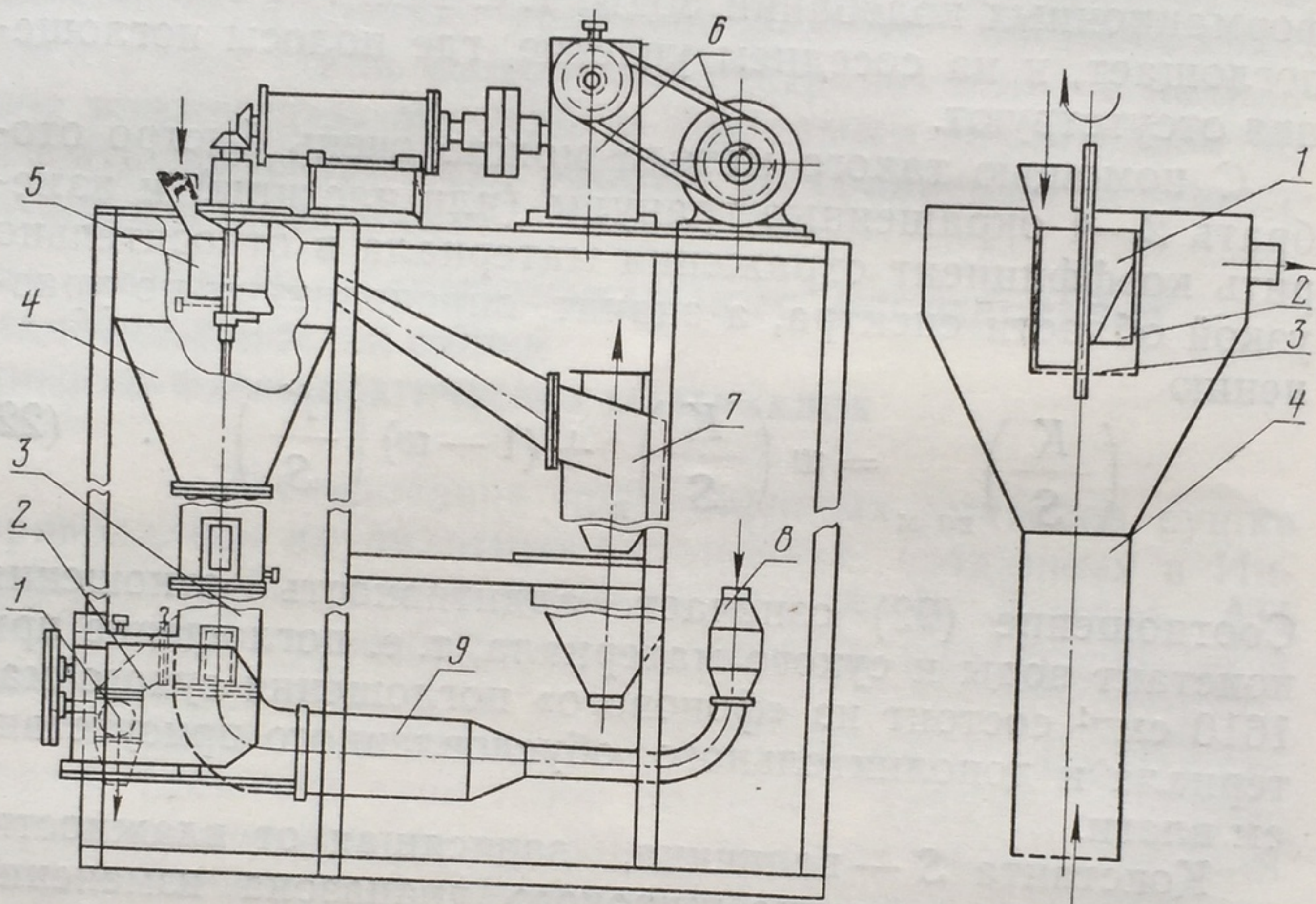


Рис. 38. Пилотная установка непрерывного действия системы ИТМО АН БССР: 1 — привод выгрузочного устройства; 2 — выгрузочное устройство; 3 — вертикальная часть сушильной камеры; 4 — сепарационное пространство сушильной камеры; 5 — гранулятор; 6 — привод гранулятора; 7 — циклон; 8 — воздуходувка; 9 — калорифер

Рис. 39. Схема гранулятора: 1 — конус; 2 — лопасть продавливающего устройства; 3 — матрица гранулятора; 4 — сушильная камера

онной части. Внутри сепарационной части размещен гранулятор 5, который представляет собой цилиндрический корпус (рис. 39), где вращается продавливающее устройство 2, выполненное в виде трех четвертей витка вертикального шнека. Это устройство вращается по дисковой матрице 3, диаметр которой равен 1,1—1,2 диаметра шнека. По внутренней винтовой линии шнека приварен конус 1. На внешней поверхности матрицы крепятся ножи, срезающие гранулы. Масса из бункера попадает

в конус-лоток и сразу же под лопасть продавливающего вертикального шнека, что обеспечивает сохранение реологических свойств, а значит, пластичность материала для эффективной грануляции. Масса, попавшая под лопасть, выдавливается в виде гранул на внешнюю поверхность матрицы, а затем либо обрывается под весом собственной тяжести, либо срезается ножами.

В нижней части сушильной камеры расположены удерживающая решетка и выгрузочное устройство. Нагрев газов происходит в электрокалорифере. Воздух в установку нагнетался системой вентиляторов. Материал загружался через бункер. Основная часть установки — сушильная камера и гранулятор выполнены из нержавеющей стали X18H9T. Отходящие газы очищались в циклоне типа ЦН-15, снабженном бункером. За циклоном имелся фильтр, выполненный из сукна или капролок-тана.

Установка была оснащена контрольно-измерительной аппаратурой для автоматического измерения температур, замера напряжений, силы тока, расхода воздуха, высоты слоя. Габариты установки следующие: диаметр сушильной камеры 156 мм, диаметр сепарационного пространства 400 мм, диаметр гранулятора 148 мм, высота вертикальной камеры 1000 мм, высота сепарационного пространства 200 мм.

Температуру измеряли хромель-алюмелевыми малоинерционными термопарами диаметром 50 мкм, показания которых записывали на 12-точечном приборе ЭПП-09МЗ. Для регулировки температуры воздуха на входе в сушилку использовали потенциометр ЭП132-11А, для регулировки напряжения на калориферах — трансформатор РНО-250—10. Схема измерения температур представлена на рис. 40.

В опытах измеряли температуру воздуха до распределительной решетки 10, сразу после решетки 9, в ядре слоя 7, на выходе из слоя 6, в вертикальной части сушилки 5 и на выходе из сушилки 1. Воздух, расход которого фиксировали счетчиком типа РС-100, нагревали в электрокалорифере и вентилятором нагнетали в установку.

Методика эксперимента состояла в следующем. Сушильную камеру загружали сухим гранулятом в количестве, достаточном для создания кипящего слоя, верхняя граница которого должна находиться примерно на уров-

не разгрузочного отверстия. Включали газодувку, устанавливали нужный расход воздуха, затем включали электрокалорифер и по достижении заданной температуры воздуха начинали загрузку влажного материала и выгрузку сухого. После выравнивания температур сухого и мокрого термометров на выходе из сушилки считали, что аппарат вышел на стационарный режим работы.

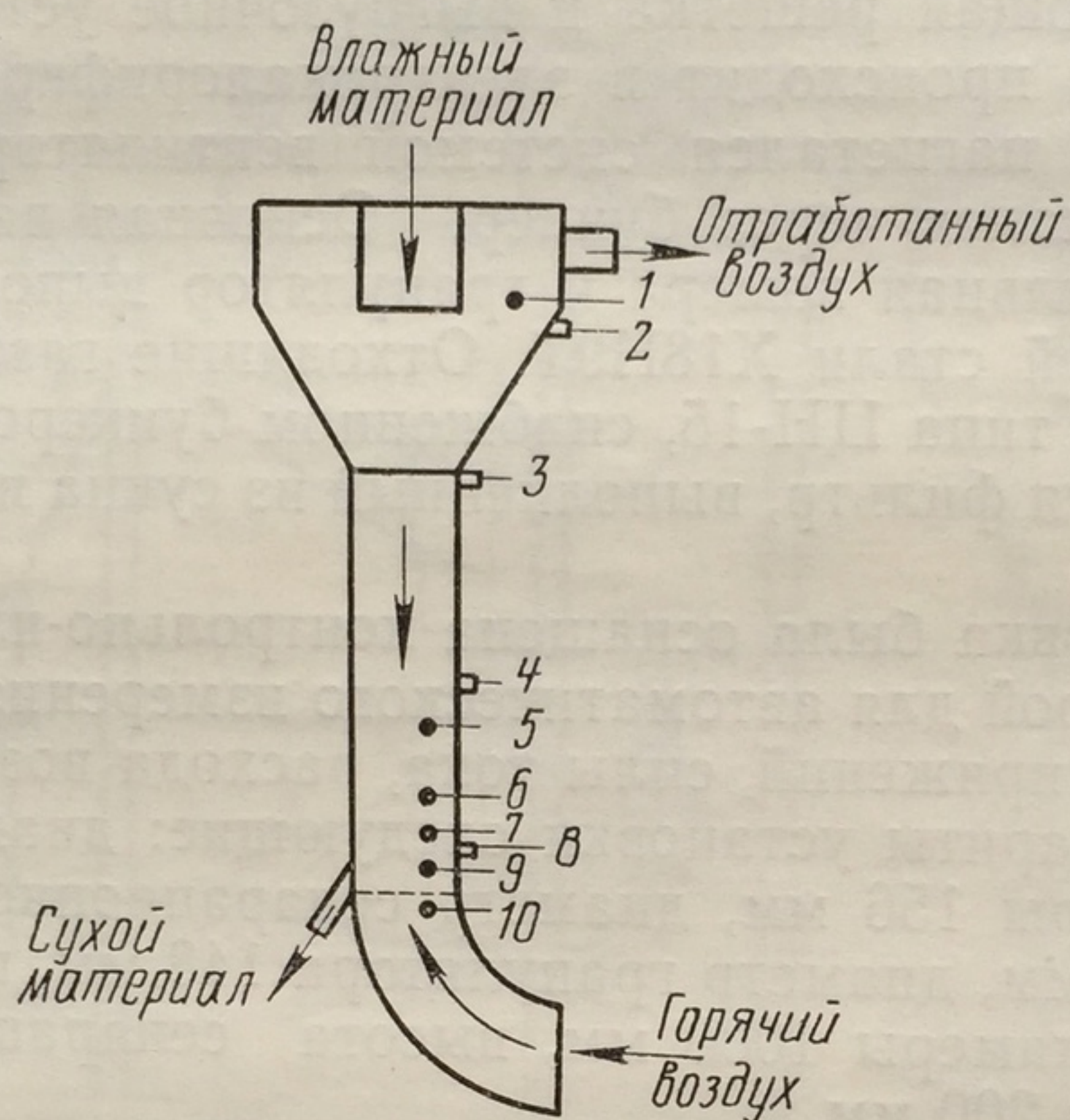


Рис. 40. Схема контроля процесса сушки на пилотной установке

Пробы материала отбирали после выхода установки на стационарный режим. Так как в кипящий слой материал попадал после подсушки в вертикальной части, пробы на влагосодержание отбирали по высоте сушилки в четырех местах (рис. 40) (2—4, 8).

Пробы в вертикальной части сушильной камеры отбирались специальным лотком-отборником, выполненным из поливинилхлоридной трубки, имеющей срез по оси, длина которого равнялась диаметру сушильной камеры. Отборник после наполнения наклоняли под углом $45-60^\circ$, и проба ссыпалась в приемник-бюкс. Для сведения баланса и определения потерь материал взвешивался до и после опыта. Производились очистка и взвешивание материала, оставшегося в грануляторе, циклоне, фильтре [96].

Для выяснения влияния рассредоточенной подачи, т. е. подачи в виде равномерного «дождя», из частиц или гранул по всему сечению были проведены опыты по исследованию сушки ряда материалов (норсульфазол, амидопирин, медицинская аскорбиновая кислота, азорибитиламин, рибофлавин и др.) при их концентрированной подаче. Методика была следующей. В сушильную камеру материал подавался шнеком. Во время опыта отбирались пробы по высоте вертикальной части в точках, обозначенных на рис. 40.

Как показали опыты, в вертикальной части в этом случае влага почти не удаляется (1—3% от начальной). Это, очевидно, происходит только за счет нагрева небольшой части материала, расположенной по поверхности концентрированного падающего «столба». Кроме того, на 30—35% увеличивается унос материала в циклон. Учитывая это, подача влажного материала происходила во всех опытах только рассредоточенно, т. е. на все зеркало кипящего слоя.

Если материал по технологическим требованиям необходимо гранулировать, то матрица гранулятора представляла собой сетку с диаметром отверстий, равным 1,5—2,5 мм; если грануляция не обязательна, то матрица имела сетку с отверстием 6—10 мм и материал рассредоточенно просеивался на зеркало кипящего слоя [97].

Для исследования процесса сушки пастообразных материалов применялась пилотная установка СГК (сушилка—гранулятор комбинированная) (см. рис. 37), которая состояла из загрузочного бункера для исходного материала 1, гранулятора-сушилки 2, сепарационной зоны 3, которая в нижней части сопряжена с вертикальной цилиндрической сушильной камерой 4, газораспределительной решетки 6, турникета для выгрузки сухого материала 9, калорифера 8, вентилятора 7, циклона 5.

Гранулятор-сушилка представлял собой вращающийся барабан, на поверхности которого имелись круговые канавки трапецевидной формы. Внутри барабана вмонтированы электронагреватели (тэны). В нижней части установлен скребок-гребенка для удаления подсохшей массы из канавок и ее срезания. Для равномерного заполнения канавок и уплотнения массы предусмотрены уплотняющие валики.

Сушильная камера представляла собой вертикальную

трубу с расширяющейся сепарационной частью. Вертикальная часть сушильной камеры имела наружный обогрев. В нижней части находилась перфорированная решетка, на которой происходило псевдоожижение высушиваемого материала.

Техническая характеристика пилотной установки СГК

Производительность по сухому продукту, кг/ч	2
Исходная влажность материала, %	75—80
Влажность материала после сушилки-гранулятора, %	50—65
Влажность сухого материала, %	5—10
Температура воздуха, подаваемого в сушильную камеру, °С	100—220
Температура нагрева барабана сушилки-гранулятора, °С	100—300
Размеры, мм	
диаметр сушильной камеры	280
диаметр сепарационного пространства	700
высота	1784
ширина	2000
Размеры трапециевидных канавок сушилки-гранулятора, мм	
основание	9
высота	10
Мощность электродвигателя сушилки-гранулятора, кВт	7
Расход воздуха, м³/ч	175
Мощность электрокалорифера, кВт	24

Установка работала следующим образом. Включался обогрев гранулятора, после достижения оптимальной температуры на поверхности гранулятора вводились в действие вентилятор, калорифер и мешалка. После этого Са-соль хлортетрациклина влажностью 75—80% загружалась в бункер гранулятора, а из него самотеком поступала в канавки вращающегося гранулятора. За время поворота от места загрузки до выгрузки масса в канавках подсыхала и удалялась из них скребком-гребенкой. Образовавшиеся гранулы неправильной формы падали в сушильную камеру, где подвергались тепловой обработке лучистым потоком от наружных стенок и нагретым движущимся воздухом. Окончательно материал досушивался в кипящем слое и турникетом непрерывно выгружался в приемный бункер.

В процессе непрерывной сушки контролировались температуры материала, входящего и выходящего из гра-

нулятора, м
из сушильн
Темпера
сушильной
автоматиче
и турникет
промежудо
тивления р
температур
Длительн
окончания
зов на влаг
лизов, опре
Замер т

Рис. 41. Схема
образных мате
продукта; 2, 3,
стенки сушильн
9 — термомпары
нулятор; 11, 12
слое; 10, 14 —

нулятора, материала в кипящем слое, воздуха на выходе из сушильной камеры.

Температуры тэнов, поверхности вертикальной части сушильной камеры, входящего воздуха регулировались автоматически. Пробы на влажность после гранулятора и турникета брались через 10—15 мин, через такой же промежуток времени фиксировались показания сопротивления распределительной решетки, кипящего слоя и температуры материала в контактном слое и по высоте.

Длительность опытов составляла 40—60 мин. После окончания опыта отбирались средняя проба для анализов на влагосодержание и фракционный состав для анализов, определяющих качество полученного продукта.

Замер температур производился с помощью Х-А ма-

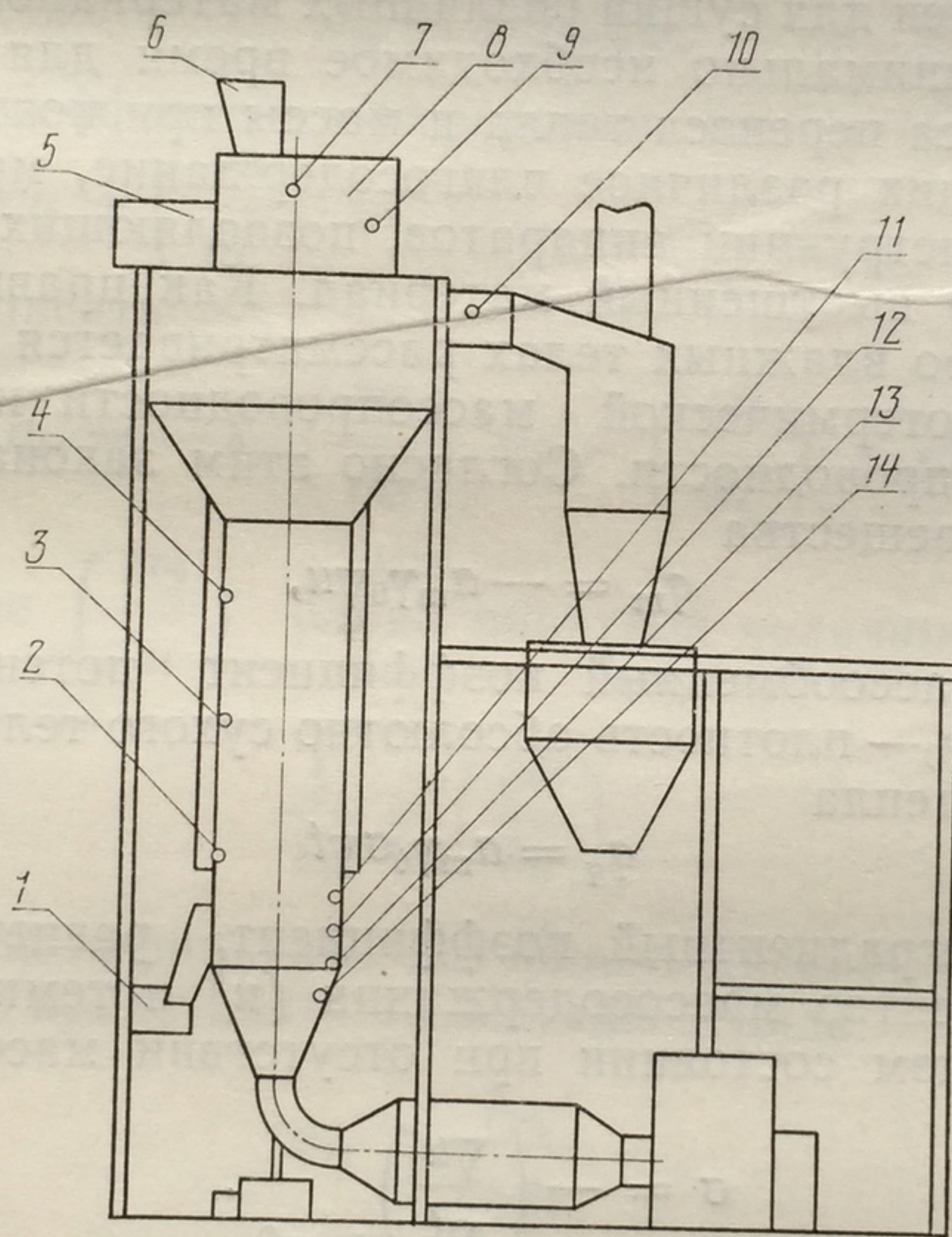


Рис. 41. Схема замера температур на пилотной установке для пастообразных материалов: 1 — привод турникета для выгрузки сухого продукта; 2, 3, 4 — термопары для замера температуры вертикальной стенки сушильной камеры; 5 — привод гранулятора; 6 — бункер; 7, 9 — термопары для замера температуры стенки гранулятора; 8 — гранулятор; 11, 12, 13 — термопары для замера температуры в кипящем слое; 10, 14 — термопары для замера температуры воздуха соответственно выходящего, входящего

лоинерционных термодпар. Схема замеров температур представлена на рис. 41. Температура стенки барабана замерялась в процессе его разогрева термодпарой 7, которая фиксировала температуру материала в грануляторе.

Испытания предложенных методов выявили необходимость дополнительных исследований некоторых процессов. К таким процессам следует отнести контактный тепло- и массообмен, происходящий в кипящем слое и в бункере-выдерживателе, т. е. после выгрузки материала из кипящего слоя, и лучистый теплообмен, имеющий место в сушилке СГК.

При поступлении влажных частиц в кипящий слой (подушку) сухих горячих частиц происходит их контакт и обмен тепла и массы. Метод контактного массообмена был применен для сушки различных материалов [98, 99].

Зная минимально необходимое время для завершения процесса переноса тепла и массы при контакте частиц, имеющих различное влагосодержание, можно рассчитать конструкции аппаратов, позволяющих получить равномерно высушенный материал. Как правило, перенос влаги во влажных телах рассматривается на основе законов изотермической массопроводности и термической массопроводности. Согласно этим законам, удельный поток вещества

$$q_m = -a_m \gamma_0 \nabla u, \quad (23)$$

где a_m — массообменный коэффициент потенциалопроводности; γ_0 — плотность абсолютно сухого тела, а удельный поток тепла

$$q_q = a_m \gamma_0 \sigma \nabla t \quad (24)$$

(σ — термоградиентный коэффициент, равный отношению градиентов массосодержания (u) и температуры в стационарном состоянии при отсутствии массообмена):

$$\sigma = - \left(\frac{\nabla u}{\nabla t} \right)_{q_m=0}. \quad (25)$$

Как известно, при наличии температурного поля перенос связанного вещества описывается законами изотермической и термической массопроводности

$$q_m = -a_m \gamma_0 \nabla u - a_m \gamma_0 \sigma \nabla t. \quad (26)$$

На уравнении (26) основывается аналитическое исследование

дование процесса сушки. По аналогии с теплообменным потенциалом (температурой t) существует массообменный потенциал Θ , который связан с массосодержанием соотношением:

$$u = c_m \Theta. \quad (27)$$

Здесь c_m — средняя удельная массоемкость.

Истинная удельная массоемкость будет равна

$$c_m = \left(\frac{\partial u}{\partial \Theta} \right)_t. \quad (28)$$

С учетом того, что удельный поток вещества q_m прямо пропорционален градиенту массообменного потенциала $\nabla \Theta$:

$$q_m = -\lambda_m \nabla \Theta,$$

где λ_m — коэффициент массопроводности; $\Theta = f(u, t)$; $\nabla \Theta = \left(\frac{\partial \Theta}{\partial u} \right)_t \nabla u + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_u \nabla t$,
можно записать

$$q_m = -\lambda_m \left(\frac{\partial \Theta}{\partial u} \right)_t \nabla u - \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_u \lambda_m \nabla t. \quad (29)$$

Выражение $\left(\frac{\partial \Theta}{\partial u} \right)_t$ равно обратной величине удельной массоемкости:

$$\frac{1}{c_m} = \left(\frac{\partial \Theta}{\partial u} \right)_t. \quad (30)$$

С учетом коэффициента потенциалопроводности, который можно представить в следующем виде:

$$a_m = \frac{\lambda_m}{c_m \gamma_0}, \quad (31)$$

получаем

$$q_m = -a_m \gamma_0 \nabla u - a_m \gamma_0 \sigma \nabla t, \quad (32)$$

где $\sigma = c_m \left(\frac{\partial \Theta}{\partial t} \right)_u$, что означает равенство термоградиентного коэффициента σ произведению удельной массоемкости на температурный коэффициент массообменного потенциала. Эти соотношения впервые были получены

А. В. Лыковым. Рассмотрим основные соотношения контактного массообмена для данного случая [98, 99].

На границе соприкосновения двух влажных частиц медицинской аскорбиновой кислоты наблюдается скачок влагосодержания при одинаковом потенциале $\Theta_{n_1} = \Theta_{n_2}$, $u_{n_1} \neq u_{n_2}$ (n — поверхность соприкосновения), который определяется отношением массоемкостей $u_{n_1}/u_{n_2} = c_{n_1}/c_{n_2}$.

Аналитическая теория молекулярного переноса показывает, что если соприкасающиеся тела являются телами полуограниченной протяженности, то скачок влагосодержаний на границе их соприкосновения остается постоянным на протяжении всего процесса массообмена. Такая же картина может иметь место при соприкосновении двух конечных тел в начальной стадии массообмена. Массообмен в соприкасающихся телах конечных размеров происходит тождественно массообмену двух полуограниченных тел, если влагосодержание конечных тел вдали от границы соприкосновения остается неизменным.

Отношение относительного потенциала $\bar{\Theta}_n$ на границе соприкосновения к разнице начальных потенциалов соприкасающихся тел — безразмерный граничный массообменный потенциал:

$$\bar{\Theta} = \frac{\Theta_n}{\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1}}, \quad (33)$$

где Θ_{n_1} , Θ_{n_2} — соответственно начальные массообменные потенциалы первого и второго тел ($\Theta_{n_1} < \Theta_{n_2}$), $\Theta_n = \Theta_{\text{гр}} - \Theta_{n_1}$; $\Theta_{\text{гр}}$ — потенциал на границе соприкосновения. Согласно теории переноса, в полуограниченных телах [98] граничный массообменный потенциал $\bar{\Theta}$ равен:

$$\bar{\Theta} = \frac{K_{me}}{1 + K_{me}},$$

а критерий массообменной активности —

$$K_{me} = \sqrt{\frac{\lambda_{m_1} c_{m_1} \gamma_{0.1}}{\lambda_{m_2} c_{m_2} \gamma_{0.2}}} = \sqrt{\frac{E_{m_1}}{E_{m_2}}}, \quad (34)$$

где E_{m_1} , E_{m_2} — соответственно коэффициенты массообменной активности первого и второго тел.

На границе соприкосновения двух полуограниченных

тел этот бе
навливается
постоянным
Теория
тел может
ны, если ма
косновения
малых разм
рактизует

Go_m — массо
характерный
В состоя
обменный по
при соприкос

Величина без
изменяться от

называется м
Как извест
соприкасающ
времени опис

$$\frac{\Theta_1(x_1, z)}{\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1}} = M$$

$$\frac{\Theta_2(x, z)}{\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1}} = M$$

где a_{m_1} и a_{m_2} —
енты потенциал

— функция

тел этот безразмерный массообменный потенциал устанавливается сразу же после соприкосновения и остается постоянным на протяжении всего процесса массообмена.

Теория контактного массообмена полуограниченных тел может быть использована для тел конечной величины, если массосодержание тел вдали от границы соприкосновения мало изменяется. Это имеет место для тел малых размеров, где начальная стадия массообмена характеризуется неравенством

$$Fo_m \leq 0, 1,$$

Fo_m — массообменный критерий Фурье: $Fo_m = a_m z / l_m^2$, l_m — характерный размер тела [99].

В состоянии термодинамического равновесия массообменный потенциал соприкасающихся тел одинаков и при соприкосновении двух полуограниченных тел

$$\Theta = \frac{K_{m\epsilon}}{1 + K_{m\epsilon}} = \text{const.} \quad (35)$$

Величина безразмерного граничного потенциала может изменяться от нуля до единицы. Величина

$$1 - \Theta = \frac{1}{1 + K_{m\epsilon}} = M_m$$

называется массообменным эффектом при контакте.

Как известно, распределение потенциала в системе соприкасающихся полуограниченных тел в любой момент времени описывается следующими соотношениями:

$$\frac{\Theta_1(x_1 z)}{\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1}} = M_m K_{m\epsilon} \left[1 + \frac{1}{K_{m\epsilon}} \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{a_{m_1} z}} \right] \text{ при } x \geq 0, \quad (36)$$

$$\frac{\Theta_2(x, z)}{\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1}} = M_m K_{m\epsilon} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2 \sqrt{a_{m_2} z}} \right] \text{ при } x \leq 0, \quad (37)$$

где a_{m_1} и a_{m_2} — соответственно массообменные коэффициенты потенциалопроводности первого и второго тел;

$$\operatorname{erf} y = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^y l^{\xi^2} d\xi$$

— функция ошибок Гаусса.

В случае, когда контакт соприкасающихся тел не идеален, на границе соприкосновения двух тел наблюдается испарение жидкости интенсивностью q_{mn} , что является стоком жидкости. В этом случае решение будет отличаться поправочным множителем, представляющим собой удвоенное произведение массообменного критерия Фурье:

$$2 \text{Ki}_m \sqrt{\text{Fo}_m} = 2 \frac{q_{mn} l_m}{\lambda_{m_1} (\Theta_{n_2} - \Theta_{n_1})} \sqrt{\frac{a_m z}{l_m^2}}. \quad (38)$$

Приближенный метод расчета контактного массообмена в слое может быть выполнен по следующей схеме. Прежде всего необходимо учесть, что в практических условиях контакт тел в слое не является идеальным, ка- сание происходит в отдельных точках поверхности. Вследствие этого возникают добавочное сопротивление переносу вещества из одного тела в другое и неодинаковые потенциалы на поверхностях частиц обоих тел. Пользуясь аналогией, рассмотренной в работах А. В. Лыкова, можно записать

$$dM = (\Theta_1 - \Theta_2) \psi_K F dz, \quad (39)$$

где dM — количество вещества, передаваемое в слое из двух зерен за время dz ; Θ_1, Θ_2 — потенциалы переноса массоотдающего и массовоспринимающего материала; ψ_K — коэффициент контактной массопроводности; F — поверхность, участвующая в контактном массообмене. Теоретическое определение ψ_K затруднено, и его, как правило, получают экспериментально.

Учитывая, что $\Theta = u/c_m$, будем иметь

$$dM = \psi_K F \left(\frac{u_1}{c_{m_1}} - \frac{u_2}{c_{m_2}} \right) dz, \quad (40)$$

где c_{m_1}, c_{m_2} — удельные массоемкости обоих участвующих в массообмене тел. После подстановок и преобразований уравнение материального баланса переноса вещества примет вид

$$(du)_z = \left[\frac{u_{n_1} - \varphi_0 (u_2 - u_{n_1})}{c_{m_1}} - \frac{u_2}{c_{m_2}} \right] \frac{\psi_K F}{G_2} dz,$$

интегрирование и решение которого дают

$$\frac{\Theta_{k_1} - \Theta_{k_2}}{\Theta_{n_1} - \Theta_{n_2}} = \exp \left[- \frac{\psi_k F z}{G_2} \left(\frac{\varphi_0}{c_{m_1}} + \frac{1}{c_{m_2}} \right) \right]. \quad (41)$$

Обозначив

$$\frac{\Theta_{k_1} - \Theta_{k_2}}{\Theta_{n_1} - \Theta_{n_2}} = \tau, \quad (42)$$

найдем коэффициент эффективности контактного массообмена [99]. Если массообмен происходит между имеющими различное удельное массосодержание частицами одного и того же материала и удельные массоемкости частиц, отдающих и принимающих вещество, можно считать одинаковыми, то получим одно уравнение

$$\tau_n = \exp \left[- \frac{\psi_k z f_{уд}}{c_m} (1 + \varphi_0) \right]. \quad (43)$$

Уравнение (43) позволяет экспериментально найти значение величины ψ_k/c_m для данной системы тел:

$$\frac{\psi_k}{c_m} = - \frac{\ln \tau_n}{z f_{уд} (1 + \varphi_0)}, \quad (44)$$

где φ_0 — отношение весовых количеств.

Величина коэффициента τ_n определяется по результатам опытов из уравнения $\tau_n = \frac{\Theta_{k_1} - \Theta_{k_2}}{\Theta_{n_1} - \Theta_{n_2}}$. Сухой и влажный материал, окрашенный метиленовой синей, быстро смешивался в заданных количествах, выдерживался определенное время в изотермических условиях, а затем разделялся и анализировался на влажность. Для этого были изготовлены металлические стаканы с двойными стенками, дном и навинчивающейся крышкой. Стаканы изолировались удалением воздушной прослойки откачкой или заполнением межстеночного пространства асбестовой крошкой.

Полученное значение τ для этой системы позволяет определить необходимую продолжительность контакта, которая с учетом наибольшего размера (длина гранул равна 4 мм, длина кристаллов — 0,5 мм) и насыпного веса материала составляет для медицинской аскорбиновой кислоты (таблетуемой) 0,03 ч, для норсульфазола — 0,08, для пиридоксина — 0,04, для медицинской ас-

корбиновой кислоты кристаллической — 0,01, для тройчатки — 0,025 ч.

Исследование процесса термической обработки ряда материалов было нами выполнено также с помощью дериватографического метода, который является в настоящее время одним из перспективных. Он объединяет термографический метод и дифференциально-термический анализ. На основании данного метода фирмой «МОМ» разработан прибор дериватограф, позволяющий из одной навески на одном и том же листе фотобумаги автоматически получать температурную и дифференциальную кривые нагрева и одновременно интегральную и дифференциальную кривые потери веса [100, 101]. Это повышает точность эксперимента и значительно сокращает время исследования. Анализируя выявленные зависимости, можно получить полную картину качественного и количественного изменений состава вещества, которое подвергается той или другой термической обработке.

Схема и принцип действия дериватографа показаны на рис. 12. Исследуемое инертное вещество помещают в тигельки специальной формы, расположенные в печи. Тигелек с пробой устанавливается на фарфоровой трубке-держателе, внутри которой находятся провода дифференциальной ПП-термопары, соединенной с зеркальным гальванометром ДГ, записывающим дифференциальную кривую нагрева ДТА на фотобумаге, намотанной на барабане самописца типа Курнакова.

Фарфоровая трубка, держащая фарфоровый или платиновый тигель с пробой, закрепляется на одном конце коромысла весов, а на другом — нить, на которой подвешена электрокатушка, свободнодвигающаяся между полюсами постоянного магнита. Силовое поле магнита индуцирует в движущейся катушке постоянный ток, напряжение которого пропорционально отклонению весов. Возникающий в катушке ток подается на зажимы зеркального гальванометра ДГ, световой сигнал которого на фотобумаге записывает дифференциальную кривую потери веса ДТГ и одновременно интегральную кривую потери веса ТГ. Зеркальный гальванометр соединен простой ветвью термопары, горячий спай которой помещен в изучаемое вещество. Температурная кривая также оптически регистрируется на фотобумаге самописца. Для измерения температуры в пробе или внутри инертного

вещества имеется коммутатор, переключающий термопары и соответственно гальванометры T и DT . Тигельки, куда помещаются проба и эталон, имеют специальную форму, предохраняющую от прямого соприкосновения горячего спая с пробой или инертным веществом.

Таким образом, измерение температур термических эффектов производится не внутри самой пробы, как в классических термических установках, а посредством измерения температуры пробы горячим спаем термопары через стенку у впадины тигля.

Небольшое воздушное пространство в тигле, где размещается горячий спай, имеет незначительную теплоемкость по сравнению со стенками платинового тигля. Поэтому можно допустить, что горячий спай термопары будет измерять температуру стенок самого тигля, т. е. температуру массы изучаемого вещества.

Исследуемое вещество и эталон помещаются в тигли, позволяющие брать навески от 0,2 до 10 г. Максимальная чувствительность весов при записи кривой потери веса составляет 0,2 мг на деление при навеске 200 мг.

Нагрев электропечи регулируется программным управлением со скоростями нагрева 0,5—20 °C в минуту. Максимальная температура печи 1500 °C. Отсчет температур на фотобумаге с кривыми происходит с точностью 0,5%. В печь можно подводить инертные газы или же воздух для ее вентиляции.

Время одного оборота барабана фотосамописца составляет 25, 50, 100, 200, 400 мин и для разлиновки бумаг — 6 мин. На рис. 42 изображена типичная термограмма, записанная на дериватографе. Дифференциальная кривая нагревания обозначена DTA , температурная — T , интегральная кривая потери веса — TG , дифференциальная кривая DTG . До начала регистрации кривых специальными приспособлениями (шаблонами) оптически впечатываются на термограмму шкалы времени вращения барабана самописца, температур и для регистрации потери веса. Деления на шкале потери веса равномерные и выбираются с учетом чувствительности весов, температурные — неравномерные и определяются в зависимости от предельных температур нагрева печи 150, 250, 500, 900, 1000, 1500 °C с учетом величины добавочного сопротивления, включаемого в цепь зеркального гальванометра T и термопары. Все кривые на термограм-

ме записаны в координате «время», расшифровка может производиться с помощью температурной кривой T , показывающей изменение температуры пробы во времени. Для этого необходимо в точках пересечения температурной кривой T с горизонтальными калибровочными температурными линиями, впечатанными оптически на термограмму, вычертить карандашом вертикальные прямые линии, соединяющие соответствующие отметки времени,

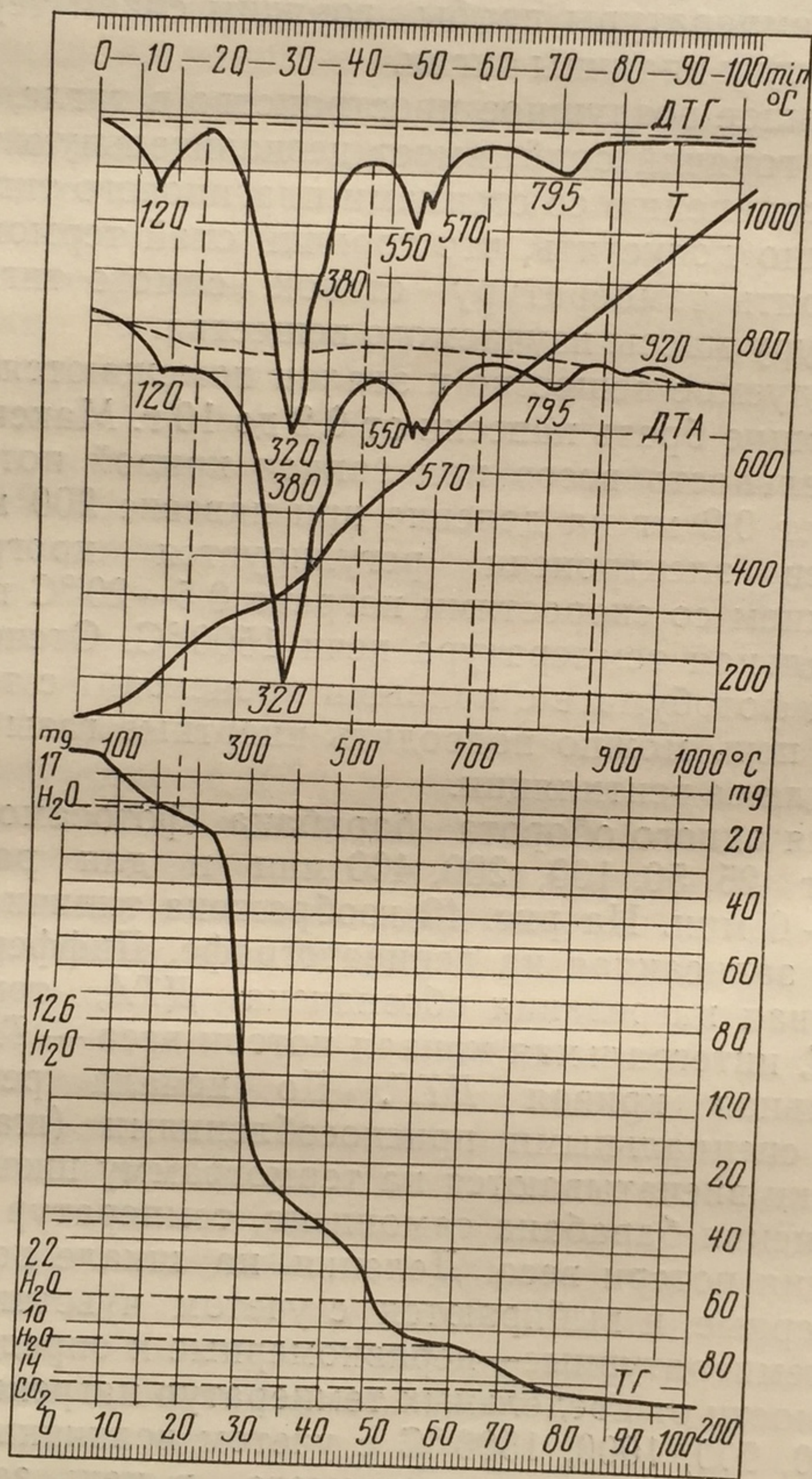


Рис. 42. Термограмма, полученная на дериватографе системы МОМ.

находящиеся по обоим краям бумаги. Полученная таким образом горизонтальная температурная шкала дает возможность определять температуры начала, конца и максимального развития термических эффектов на дифференциальных кривых нагревания ДТА и потери веса ДТГ. Одновременно проектируя минимумы и максимумы кривых ДТГ на кривую ТГ, можно установить величину потери веса для этих точек. Основным отличием дериватографа от других термических установок является тождественность условий проведения опыта. Это достигается одновременной регистрацией всех кривых на одном листе фотобумаги из одной и той же навески при соответствующих одинаковых температурах нагрева.

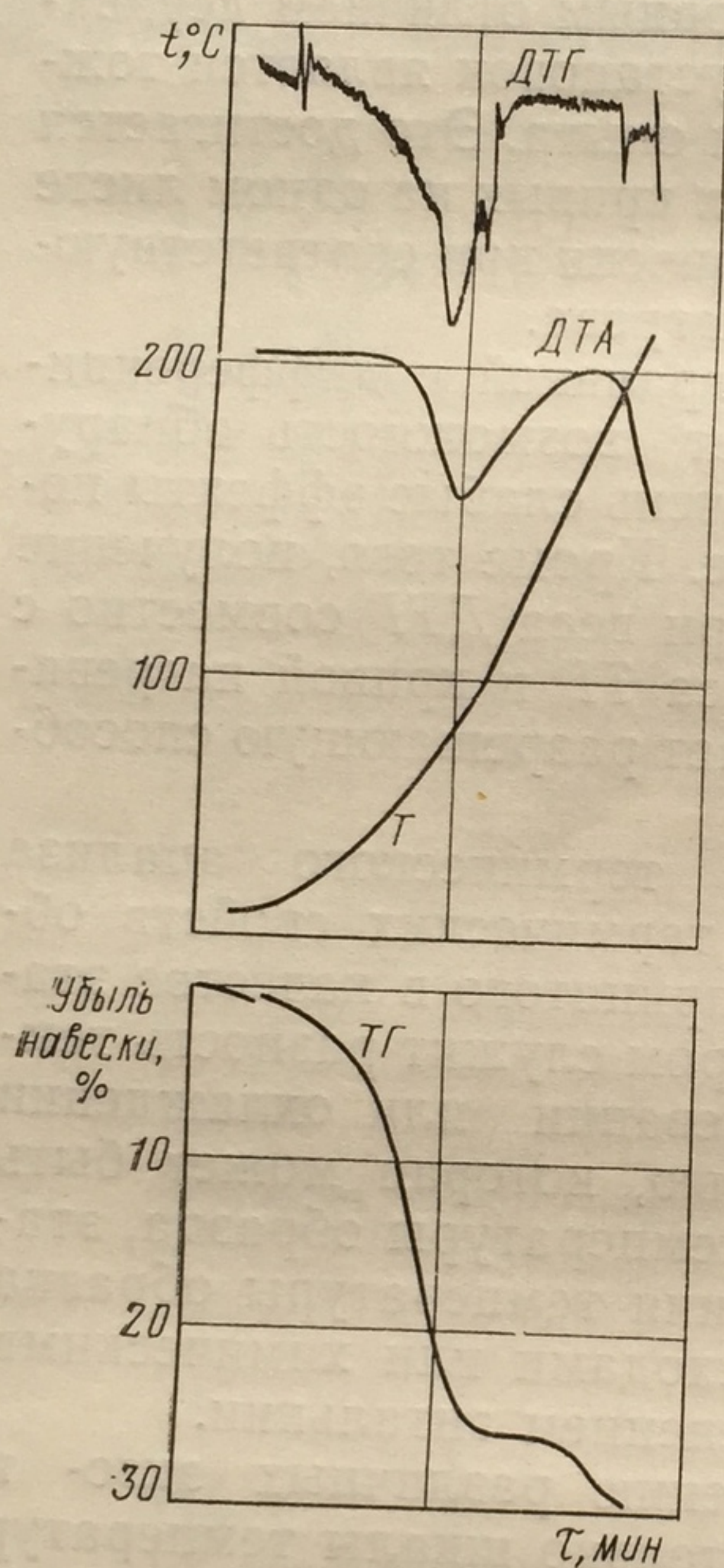
Совместное получение интегральной и дифференциальной кривых потери веса дает возможность обнаружить и количественно оценить очень слабые эффекты потери веса в изучаемом веществе. Кроме того, получение дифференциальной кривой потери веса ДТГ совместно с интегральной кривой потери веса ТГ и кривой нагревания ДТА значительно увеличивает разрешающую способность метода.

Метод дифференциального термического анализа (ДТА) основан на сравнении термических свойств образца исследуемого вещества, принятого в качестве эталона. Регистрируемым параметром служит разность температур, измеряемая при нагревании или охлаждении образца с постоянной скоростью, которая может быть представлена в виде функции температуры образца, эталона или нагревателя. Изменения температуры образца вызываются физическими переходами или химическими реакциями, связанными с изменением энтальпии.

По числу, форме и положению различных экзо- и эндотермических пиков относительно шкалы температур производится качественная оценка исследуемого вещества. Поскольку площадь пика пропорциональна изменению теплосодержания (энтальпии), метод ДТА может использоваться для полуколичественного, а в некоторых случаях и количественного определения тепловых затрат [101].

На дериватографе нами были получены характеристические кривые витамина В₁ и его полупродуктов — тиамин-бромид технического, ацетомидина и других продуктов при разных режимах — (рис. 43—50).

Необходимо отметить, что процесс термообработки исследуемых препаратов снят в динамическом режиме, т. е. изменение массы образца функционально связано с изменением температуры, времени, что создает трудности при обработке данных. Однако динамический метод деривометрии имеет свои преимущества. Как отмечает Дойль [101], одна динамическая кривая изменения мас-



сы эквивалентна большому числу соответствующих изотермических кривых, кроме того, отсутствуют ошибки, связанные с заменой образцов, поскольку всю информацию получают с помощью одного и того же образца.

Условия проведения эксперимента выбирались таким образом, чтобы можно было выделить определенную стадию термообработки и наиболее подробно исследовать. Учитывая термолабильность исследуемых материалов, мы ограничивались максимальной температурой термообработки (250—300 °C).

Рис. 43. Термограмма тиамин-бромида медицинского (витамина B₁) в области температур до 250 °C

На рис. 43 представлены термограммы тиамин-бромида медицинского, т. е. кривая убыли веса ТГ (кривая сушки), дифференциальная кривая убыли веса ДТГ (кривая скорости сушки), температурная кривая Т и дифференциальная кривая изменения теплосодержания в процессе термообработки ДТА. Термограммы сняты при следующих режимных параметрах: навеска тиамин-бромида (медицинского) — 790 мг; тигли керамические; печь № 1, блок из ZnO; температура печи — 500 °C;

процент испо
нагрева 10 °C
вительность
100 мин. Как
удаление вла
и заканчивае
детельствуют
идут параллел
ся 15 мин. 3
адает с ис
вы.ским ме
ричес

Рис. 44. Термо
7. Зак. 312

процент использования температуры печи — 50; скорость нагрева 10°C в минуту; ДТГ — $1/15$; ДТА — $1/15$; чувствительность — 500 мг; время вращения барабана — 100 мин. Как видно из полученных данных, интенсивное удаление влаги начинается уже при температуре 30°C и заканчивается при температуре $110\text{--}120^{\circ}\text{C}$, о чем свидетельствуют кривые ДТГ и ДТА, которые практически идут параллельно оси времени. Весь процесс сушки длится 15 мин. За этот период удаляется 26% влаги, т. е. совпадает с исходной влажностью, определенной тензометрическим методом. Процесс сушки сопровождается эндо-

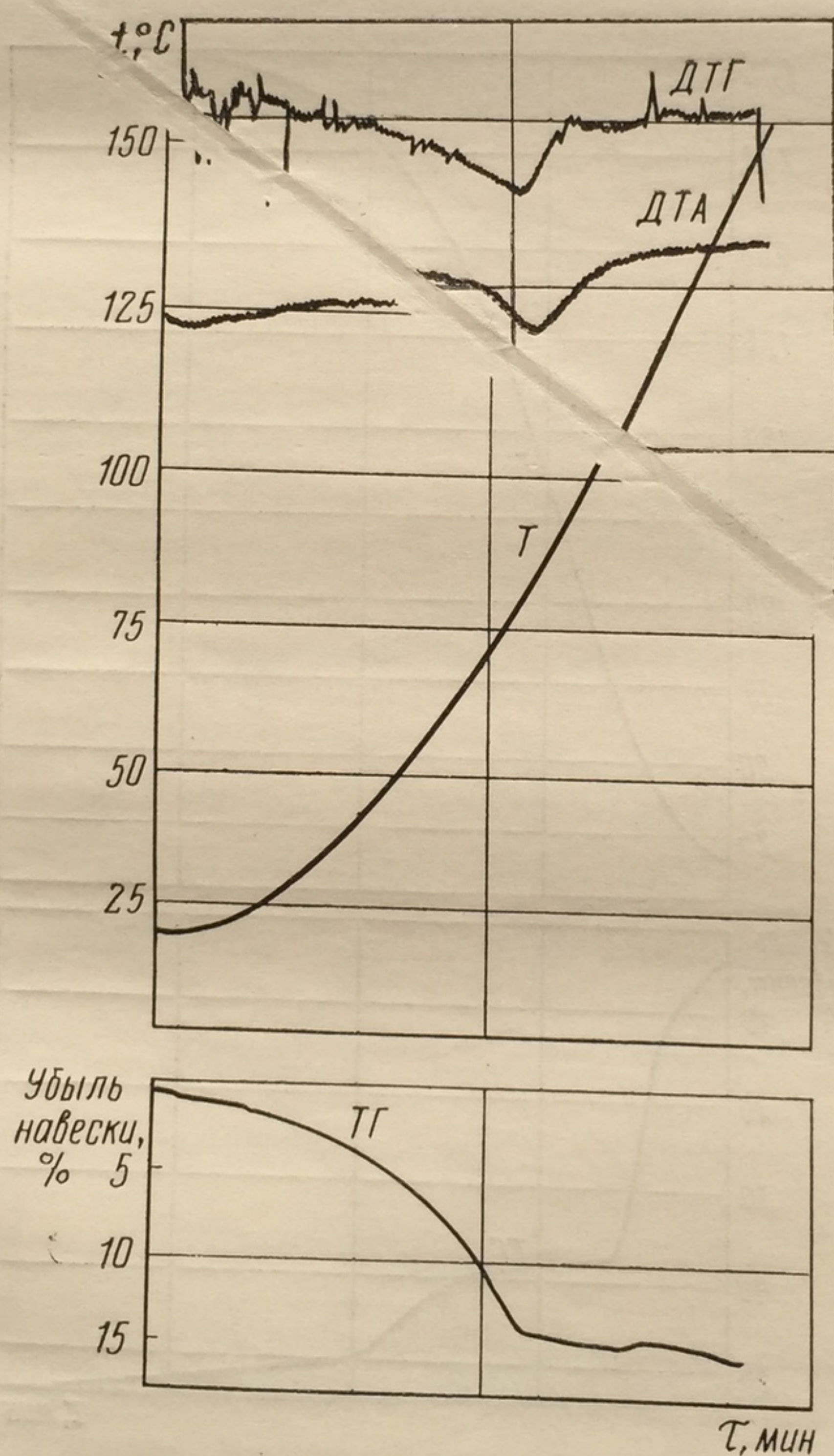


Рис. 44. Термограмма тиамин-бромид медицинского в области температур до 150°C

термическим эффектом. Количественно величину этого эффекта можно получить по зависимости Греема [100].

Как видно из кривых $TГ$ и $ДТГ$, при удалении влаги в рассматриваемых режимах наблюдаются четыре характерные точки: первая соответствует началу прогрева материала и удалению влаги при температуре 25—30 °С, вторая — максимальной скорости удаления влаги и максимальному эффекту при температуре 70—75 °С. Потеря веса, соответствующая этой температуре, составляет 70% от исходного влагосодержания. По-видимому, от

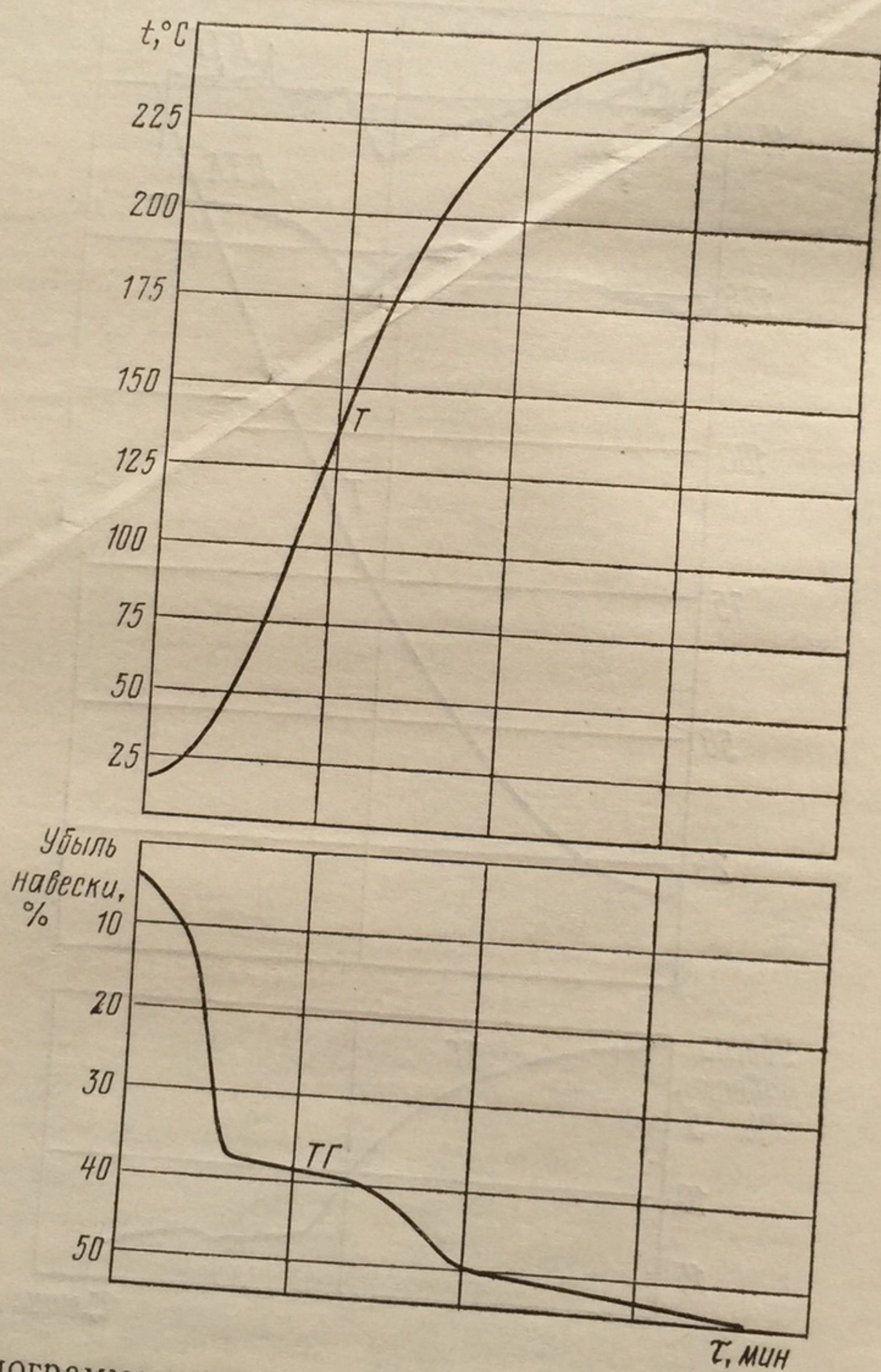


Рис. 45. Термограмма тиамин-бромиды технического в области температур до 250 °С

30 до 75 °С идет удаление свободно-связанной влаги. Это подтверждается прямолинейной зависимостью скорости сушки, равной заданному по программе темпу нагрева. Дальнейшее уменьшение влагосодержания сопровождается повышением температуры до 90—95 °С и снижением скорости нагрева. Этот участок соответствует, на наш взгляд, удалению структурно-связанной влаги, обусловленной слоевым эффектом навески в керамическом бюксе. В период от 75 до 95 °С удаляется до 7% влаги. И, наконец, четвертая характерная точка на кривой ТГ соответствует остаточной влажности, равной 1%. В этой точке кривая ТГ резко изменяет свое направление, приближаясь к прямой, параллельной оси времени. Как видно, процесс сушки заканчивается при температуре материала 110—120 °С. На этом участке проис-

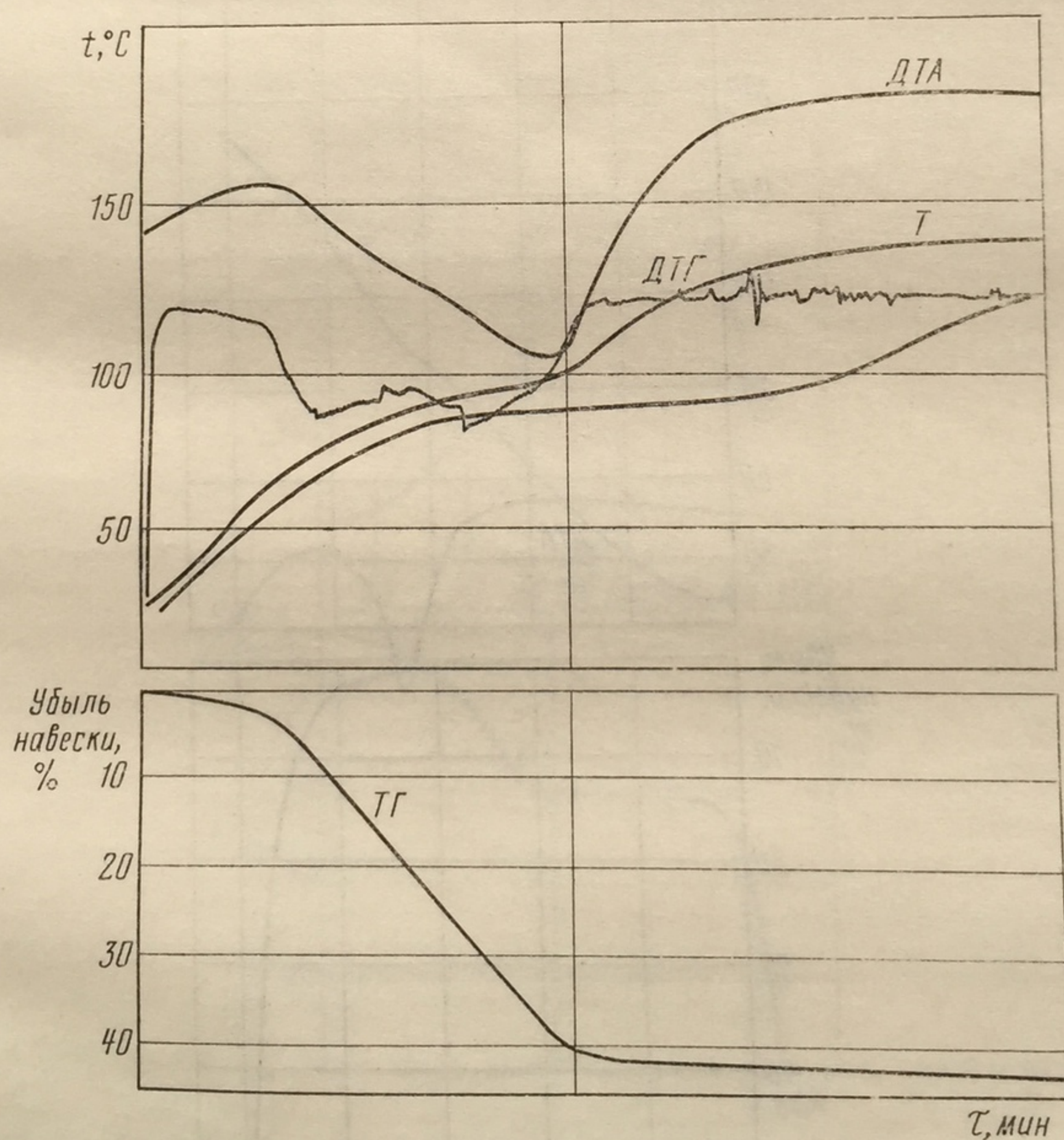


Рис. 46. Термограмма тиамин-бромида технического в области температур до 150 °С

ходит удаление связанной влаги. Это подтверждается результатами эксперимента, проведенного при изотермических условиях.

Как видно из термограмм (рис. 43), при последующей термообработке тиамин-бромиды медицинского уменьшения веса и изменения скорости этой убыли практически не было обнаружено вплоть до температуры 190—200 °С. Кривые ДТГ и ДТА шли параллельно оси времени. При температуре 190—200 °С на кривых ТГ и ДТГ наблюдается скачок, сопровождающийся значительным

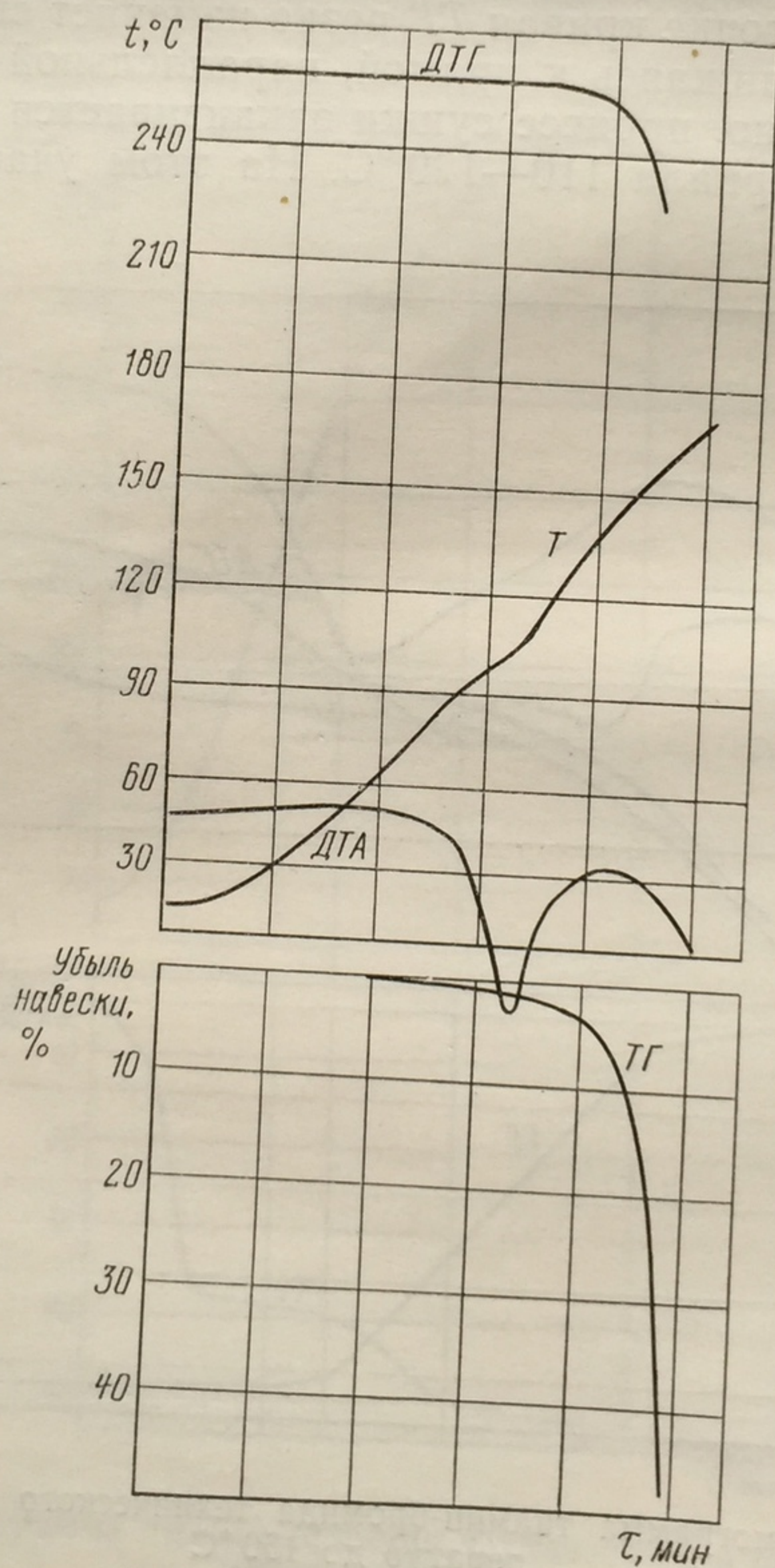


Рис. 47. Термограмма ацетомидина

эндотермическая
сталлизация
пературы
нию веса
происходит
свидетель
разец пос
кокс. Для
ги, обусло
был прове
бромидом
рах, тольк
позволило

Рис. 48. Терм
=1/15, V=5

эндотермическим эффектом, связанным с удалением кристаллизационной влаги. Последующее повышение температуры до 210—220 °С приводит к резкому сокращению веса и большим тепловым затратам. В этот период происходит разложение и плавление материала, о чем свидетельствует вид образца после термообработки. Образец после опыта напоминал собой пористый спекшийся кокс. Для проверки наличия структурно-связанной влаги, обусловленной только слоем навески образца, нами был проведен повторный опыт с медицинским тиаминбромидом практически при тех же режимных параметрах, только с тарельчатыми платиновыми тиглями. Это позволило распределить навеску в один слой, тем самым

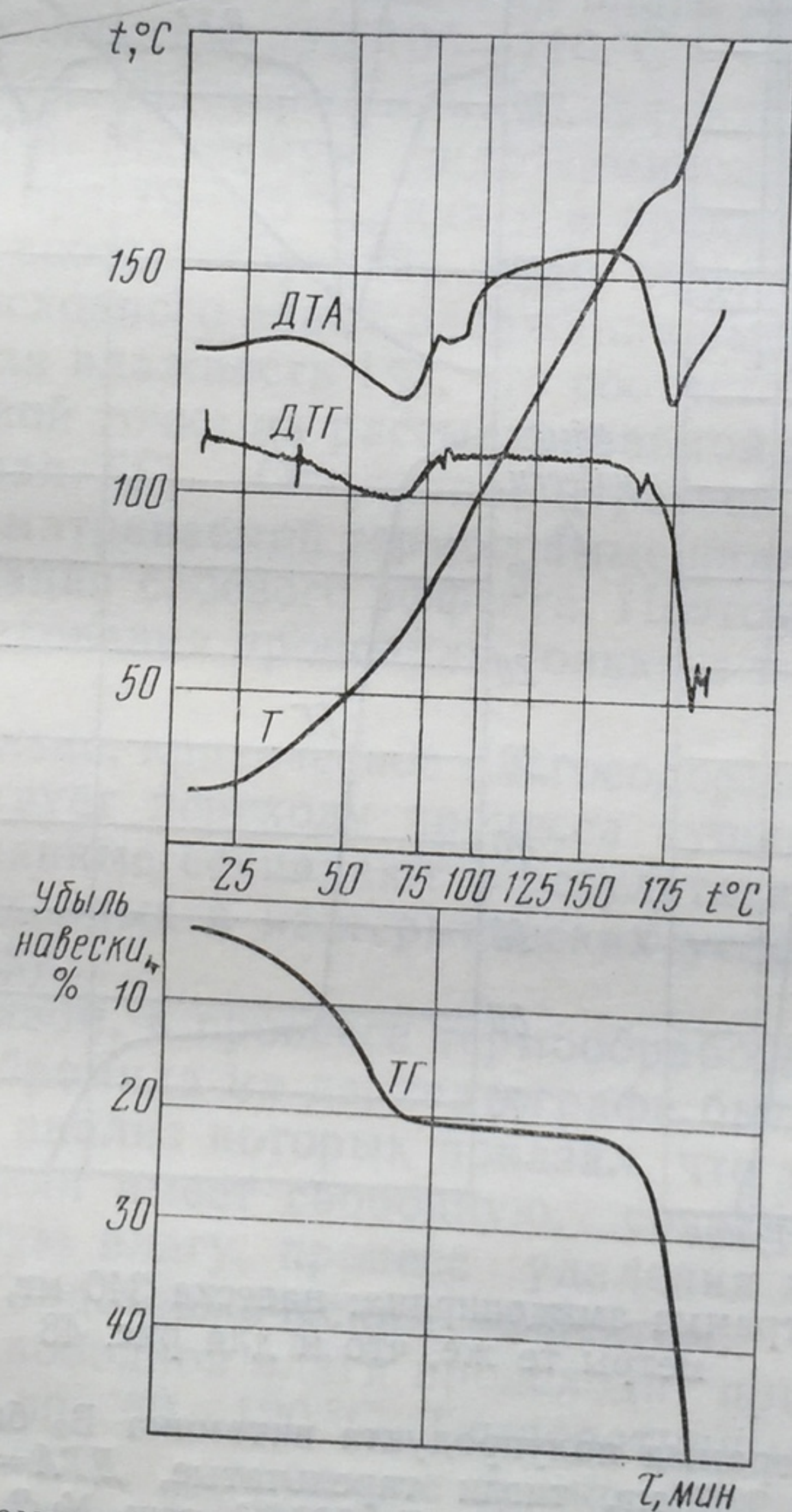


Рис. 48. Термограмма нафтамона: навеска 780 мг, $ДТД=1/15$, $ДТГ=1/15$, $V=5^\circ\text{C}/\text{мин}$, $T=250^\circ\text{C}$; тигли тарельчатые с Ag, печь № 1, время вращения барабана 100 мин

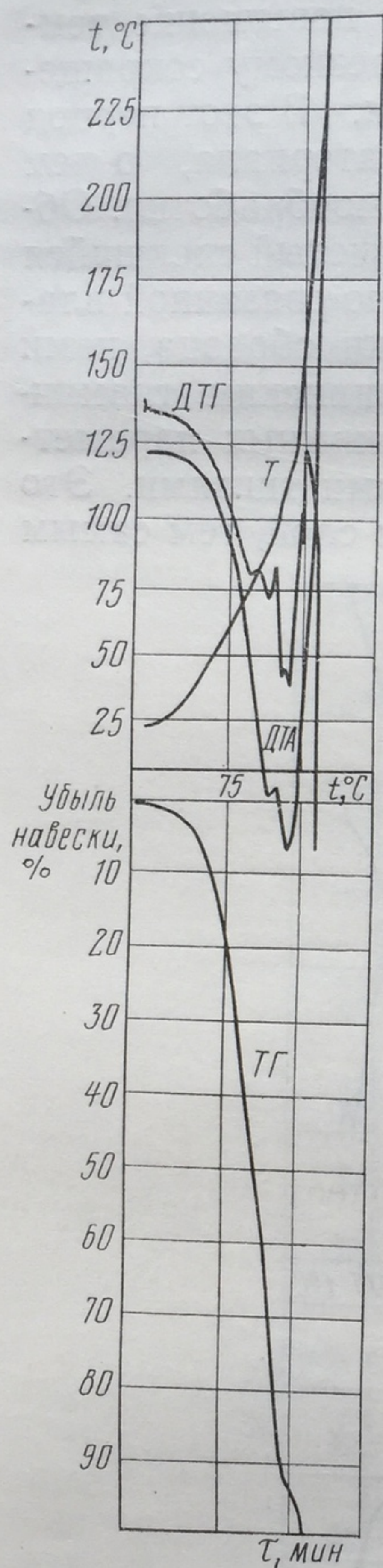


Рис. 49. Термограмма амидопирин: навеска 340 мг, остальные параметры те же, что и для рис. 48

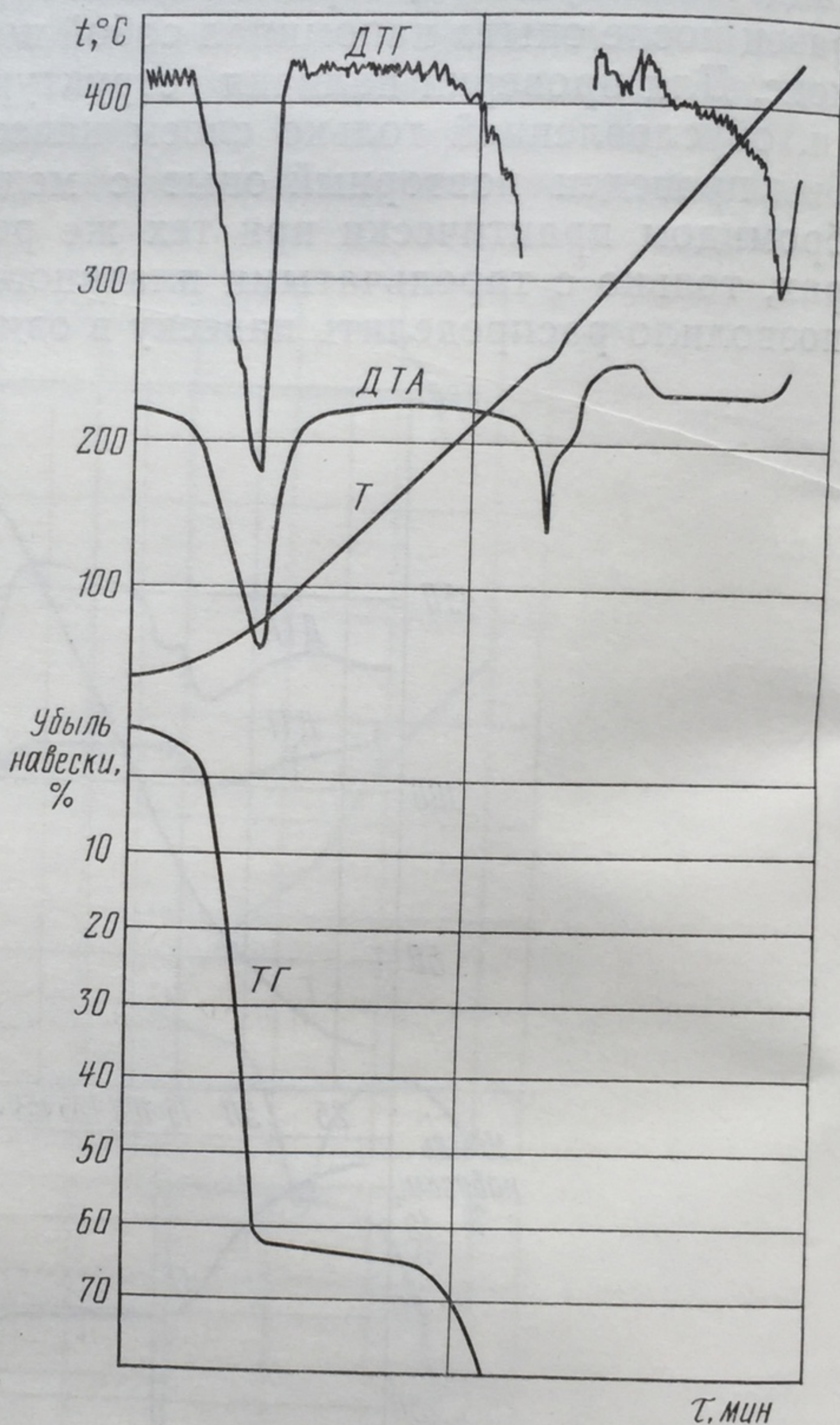


Рис. 50. Термограмма полупродукта витамина В₂ барбитуровой кислоты: навеска 92,7 мг, тигли тарельчатые, $DTA=1/10$, $DTG=1/10$, $V=10^\circ\text{C}/\text{мин}$, $T=500^\circ\text{C}$, печь № 2

исключив влияние слоевого эффекта на скорость удаления влаги. При этом вес навески несколько снизился и составил 640 мг (в керамическом тигле 790 мг). Такое изменение навески, на наш взгляд, не может повлиять на характер удаления влаги. Необходимо отметить, что исходная влажность медицинского тиамин-бромида была 15%. Как известно, изменение влагосодержания влияет на тепловые затраты, т. е. на величину эндотермического эффекта и скорость сушки, но не на характер кривой сушки. С этой точки зрения считаем, что опыты были идентичными.

Рассмотрим область с температурой до 150 °С. Как видно из рис. 44, процесс удаления влаги начинается при 25—30 °С и кончается при 105—110 °С. Процесс сушки сопровождается эндотермическим эффектом, что видно из кривой ДТА. Максимум эндотермического эффекта наблюдается при 70—75 °С, как и в предыдущем опыте. Потеря веса, соответствующая этому эффекту, составляет 93,3% от исходного влагосодержания вместо 70—75%, т. е. остаточная влажность 1%, что соответствует четвертой критической точке на рассматриваемой ранее термограмме (кривая ТГ). Отсутствие третьей критической точки на рассматриваемой термограмме является результатом ликвидации слоевого эффекта. Поэтому все последующие исследования проводили только с тарельчатыми бюксами.

Следовательно, критическое влагосодержание, равное 1%, соответствует переходу процесса сушки во второй период. Эти данные совпадают с результатами экспериментов, проведенных в изотермических условиях в сушильном шкафу.

Таким образом, в процессе термообработки медицинского тиамин-бромида на дериватографе были получены термограммы, анализ которых показал, что тиамин-бромид медицинский имеет свободную, связанную и кристаллизационную влагу, процесс удаления которой сопровождается эндотермическим эффектом; максимальное удаление свободной влаги происходит при 70—75 °С, а связанной — при 80—120 °С. Температуру медицинского тиамин-бромида в процессе сушки нецелесообразно поддерживать выше 100 °С. При 200—220 °С происходит разложение и плавление материала со значительным эндотермическим эффектом.

На рис. 45 представлена дериватограмма технического тиамин-бромида. Термограмма снята при следующих режимных параметрах: навеска — 580 мг; тигли тарельчатые с Ag; печь № 1, блок из ZnO; температура печи — 250 °C; скорость нагрева — 10 °C в мин; процент использования температуры печи — 100; $ДТГ=1/15$; $ДТА=1/15$; чувствительность — 500 мг; время вращения барабана — 100 мин.

Согласно кривой $TГ$, установлено, что влажность исследуемого технического тиамин-бромида 42%. Удаление этилового спирта начинается при температуре 20 °C (первая характерная точка на кривой $TГ$). При последующем увеличении температуры материала скорость сушки повышается, достигая максимума при 75 °C (вторая точка на кривой $TГ$). За этот период удаляется 94,4% исходной влаги. В указанном интервале температур удаляется свободная влага. Третья точка на кривой $TГ$ соответствует $\omega=2,5-3\%$. При достижении этой влажности кривая $TГ$ резко изменяет свое направление, приближаясь к прямой, параллельной оси времени. В этот период происходит удаление связанной влаги. Значение критического влагосодержания, определенного на дериватографе, совпадает с данными тензометрического анализа.

При температуре 190—220 °C у технического тиамин-бромида наблюдается снижение веса, которое сопровождается эндотермическими эффектами. Это результат разложения, а затем плавления материала. Пробы после термообработки имели обугленный вид со вспученностями. Таким образом, технический тиамин-бромид имеет свободную, связанную и кристаллизационную влагу; процесс удаления влаги сопровождается эндотермическими эффектами; максимальное удаление свободной влаги происходит при температуре 70—75 °C; при температуре 80—170 °C удаляется адсорбционно-связанная влага; удаление кристаллизационной влаги, разложение и плавление материала происходит при 190—220 °C с эндотермическими эффектами.

Термограммы ацетомидина (рис. 47) сняты при следующих режимных параметрах: навеска — 660 мг; тигли тарельчатые с Ag; печь № 1, блок из ZnO; температура печи — 300 °C; скорость нагрева — 10 °C в минуту; процент использования температуры печи — 100; $ДТГ=$

$=1/10$; $ДТА=1/10$; чувствительность — 100 мг; время вращения барабана — 60 мин. Как видно из термограмм, ацетомидин имел исходную влажность до 3%. Процесс удаления влаги начинается при 50—55 °С и сопровождается значительным эндотермическим эффектом при 105—110 °С. При 140—150 °С происходит плавление и разложение материала. Согласно термограмме, можно утверждать, что ацетомидин имеет связанную влагу, температура сушки которого не должна превышать 140 °С.

Таким образом, в результате проведенных дериватографических исследований витамина В₁ и его полупродуктов определены влагосодержание, наличие разных форм связи влаги с материалом, зоны их перехода и температурные интервалы удаления, а также изменение энтальпии в процессе термообработки.

Применение этого прибора в исследовательской и производственной практике, на наш взгляд, очень перспективно. Помимо уже отмеченных преимуществ и возможностей, с помощью дериватографа можно получить коэффициент сушки целого класса материалов в идентичных условиях с минимальными ошибками и решить задачу нахождения кинетики сушки расчетно-теоретическим путем, полагая, что относительный коэффициент сушки является величиной, связывающей кинетику и статику сушки.

3.3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ МЕХАНИЗМА СУШКИ ХИМИКО-ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Исследование процесса сушки химико-фармацевтических препаратов проводилось по группам с учетом особенностей препаратов как объектов сушки. К классу кристаллоколлоидных материалов, как уже отмечалось, относятся все лекарственные препараты, выпускаемые в таблетках. Из этого класса материалов рассмотрим однокомпонентные (норсульфазол, фтивазид, амидопирин, пиперазин, медицинская аскорбиновая кислота, ампициллин, тетрациклин и др.) и многокомпонентные препараты (пиранал, пирамеин, тройчатка), кристаллические (медицинская аскорбиновая кислота, гидрат-2-кето-*l*-гулоновой кислоты, азорибитиламин, барбитуровая кислота, рибофлавин, сорбоза, технический ви-

тамин В₁, ацетомидин, тиамин-бромид и др.), пастообразные (Са-соль хлортетрациклин, жом облепихи и др.).

Для кристаллоколлоидных материалов, как правило, необходима предварительная грануляция, поэтому матрица гранулятора собиралась из сетки с отверстиями 1,5—2 мм.

Сушка материала происходила вначале в падающем слое. Методика замеров позволяла определять характер кривой удаления влаги по высоте колонны и влагосодержание в конце вертикальной камеры, т. е. при входе материала в кипящий слой.

Исследования выполняли для большинства взятых материалов и из одного опыта получали сведения о процессе сушки как в падающем, так и в кипящем слое. Для кристаллоколлоидных и кристаллических материалов изучалось изменение влагосодержания материала по высоте в зависимости от температуры теплоносителя, его скорости. Из многочисленных экспериментов были установлены характер распределения влагосодержания по высоте вертикальной части сушильной камеры и степень снижения влажности. Рассмотрим распределение влаги по высоте для некоторых материалов. На рис. 51—53 представлено изменение влагосодержания материалов по высоте в зависимости от температуры выходящего из кипящего слоя воздуха и его скорости. Эксперименты показали линейную зависимость влагосодержания от высоты камеры и увеличение интенсивности с возрастанием температуры и скорости сушильного агента.

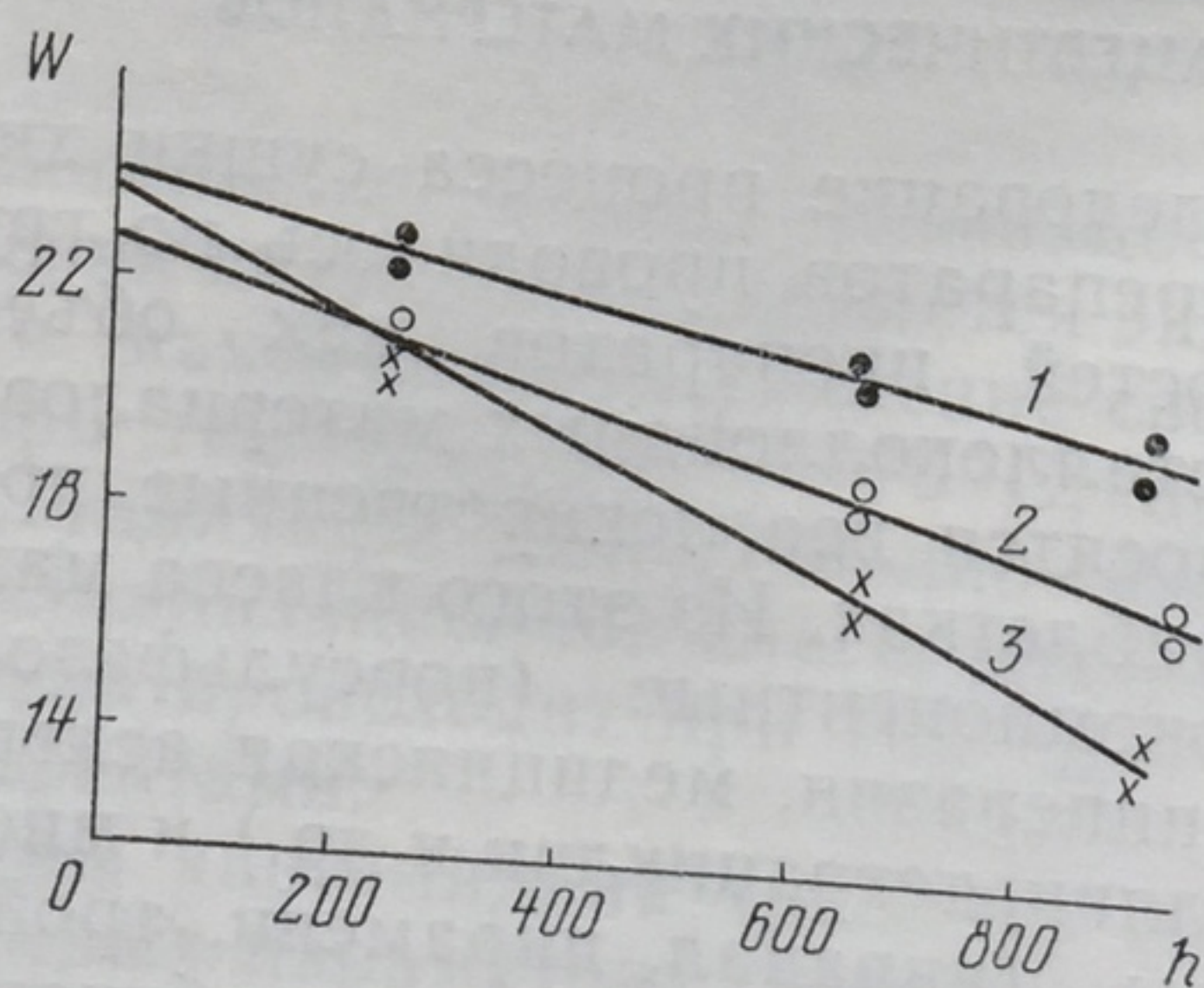


Рис. 51. Изменение влагосодержания норсульфазола по высоте сушильной камеры от температуры входящих газов: 1 — $T=100^{\circ}\text{C}$; 2 — 120; 3 — 150

Процесс с процессами раметров обмена и технол 150 °C не допирина

Рис. 52. Изм ния по высо в зависимо 1, 1' — $V=0,6$ фазол); 2, (для гидрат кислоты); 3, (ам

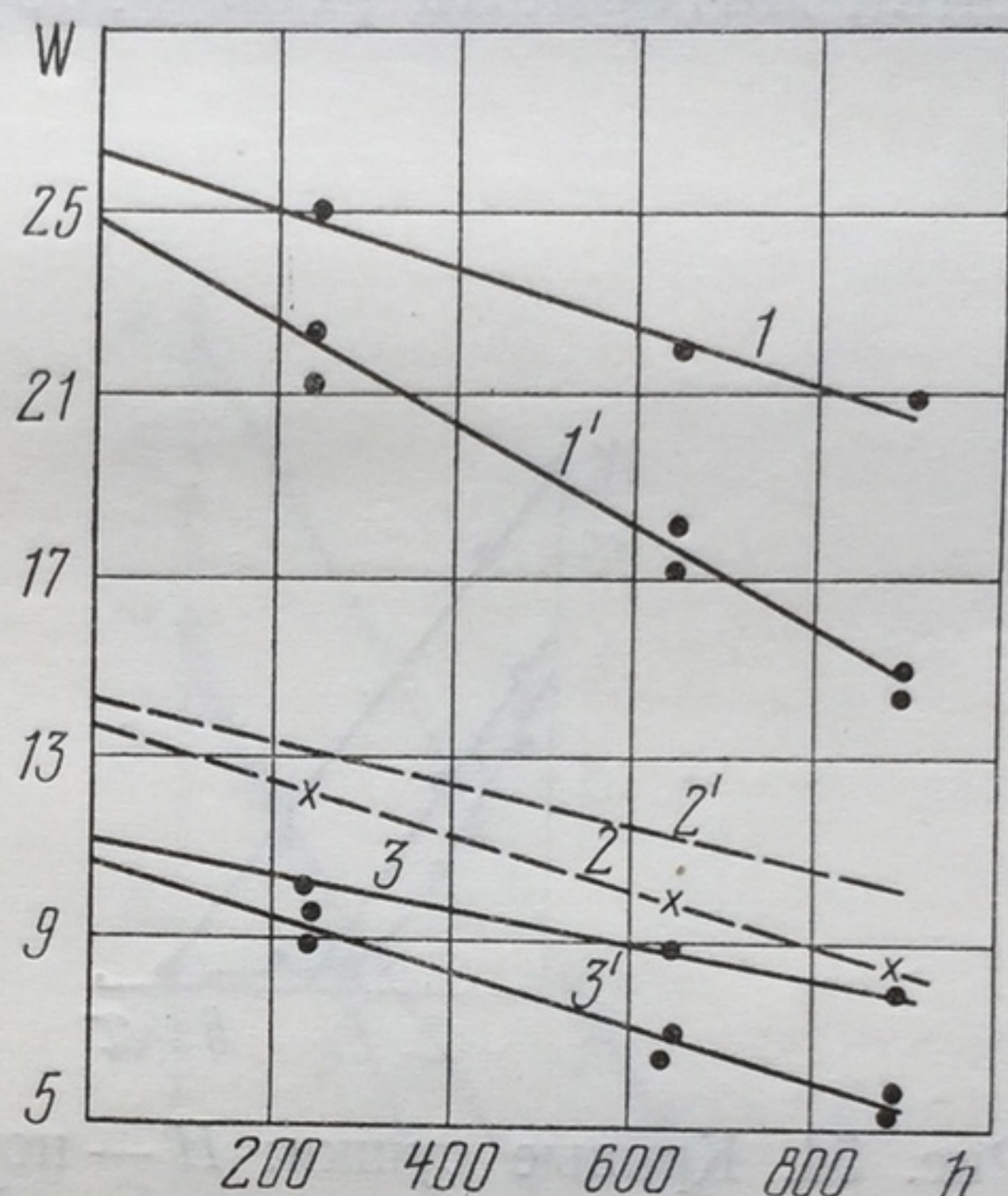
ричевые в интенсифика мальной.

Процесс соте происхо симости от п удаленной вл Это зависит

Рис. 53. Распреде ры: 1 — азори

Процесс сушки в падающем слое органически связан с процессом сушки в кипящем слое, и поэтому выбор параметров теплоносителя зависит от условий тепло- и массообмена в кипящем слое, термолабильности материала и технологических требований. Например, температура 150 °С не может считаться приемлемой при сушке амидопирин, так как препарат желтеет и появляются ко-

Рис. 52. Изменение влагосодержания по высоте сушильной камеры в зависимости от скорости газов: 1, 1' — $V=0,69, 1,29$ м/с (норсульфазол); 2, 2' — $V=0,5, 1,1$ м/с (для гидрата-2-кетол-гулоновой кислоты); 3, 3' — $V=0,79, 0,95$ м/с (амидопирин)



ричневые вкрапления. Поэтому несмотря на меньшую интенсификацию, температура 90—100 °С является оптимальной.

Процесс сушки ряда материалов на исследуемой высоте происходит по линейному закону (рис. 53). В зависимости от параметров сушильного агента количество удаленной влаги изменяется от 10 до 40% от исходного. Это зависит от свойств материалов, которые определяют

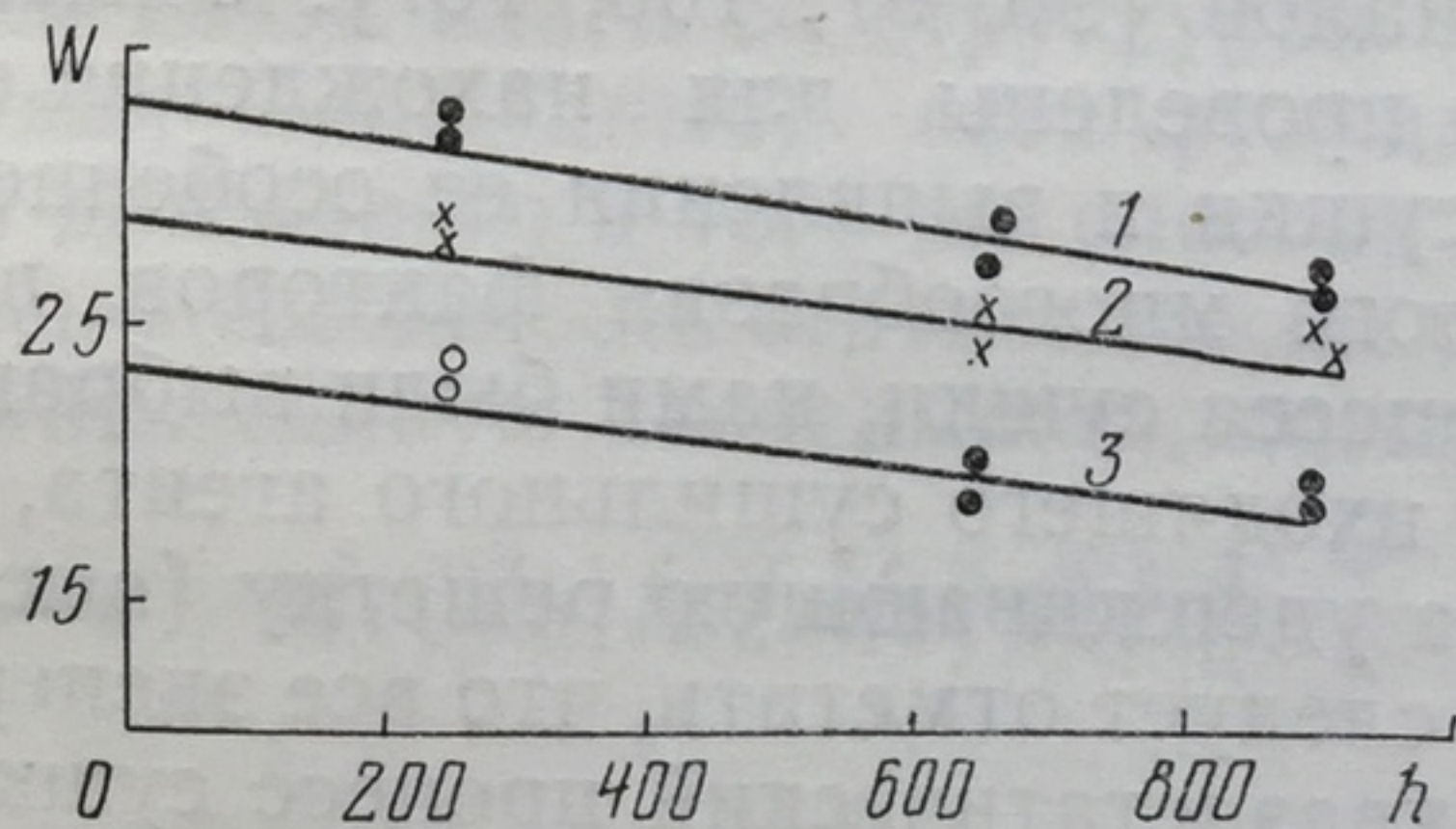


Рис. 53. Распределение влагосодержания по высоте сушильной камеры: 1 — азорибитиламин; 2 — тетрациклин; 3 — рибофлавин

условия сушки в кипящем слое. Как правило, температура материала в кипящем слое равна температуре выходящих из него газов.

Исследование процесса сушки в кипящем слое выполнялось по методике, описанной выше. Прежде чем найти оптимальные параметры сушки, определялись энергия связи влаги с материалом, температура плавления и возгонки материала [102—105].

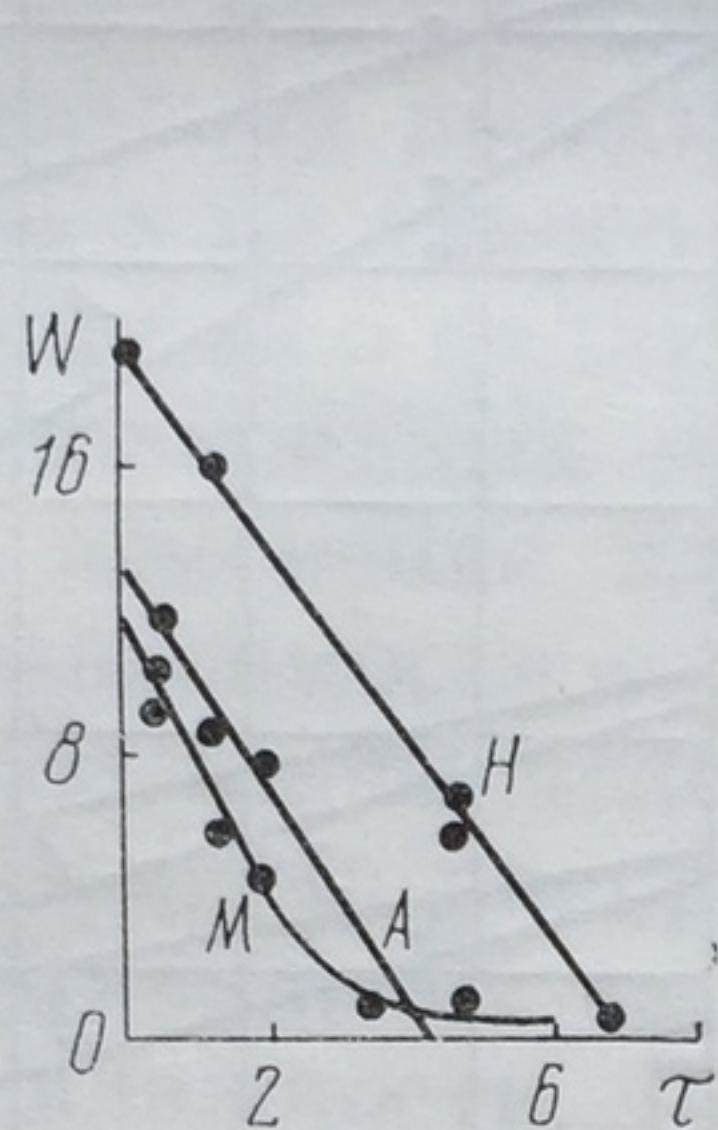


Рис. 54. Кривые сушки: *H* — норсульфазол; *A* — амидопирин; *M* — МАК

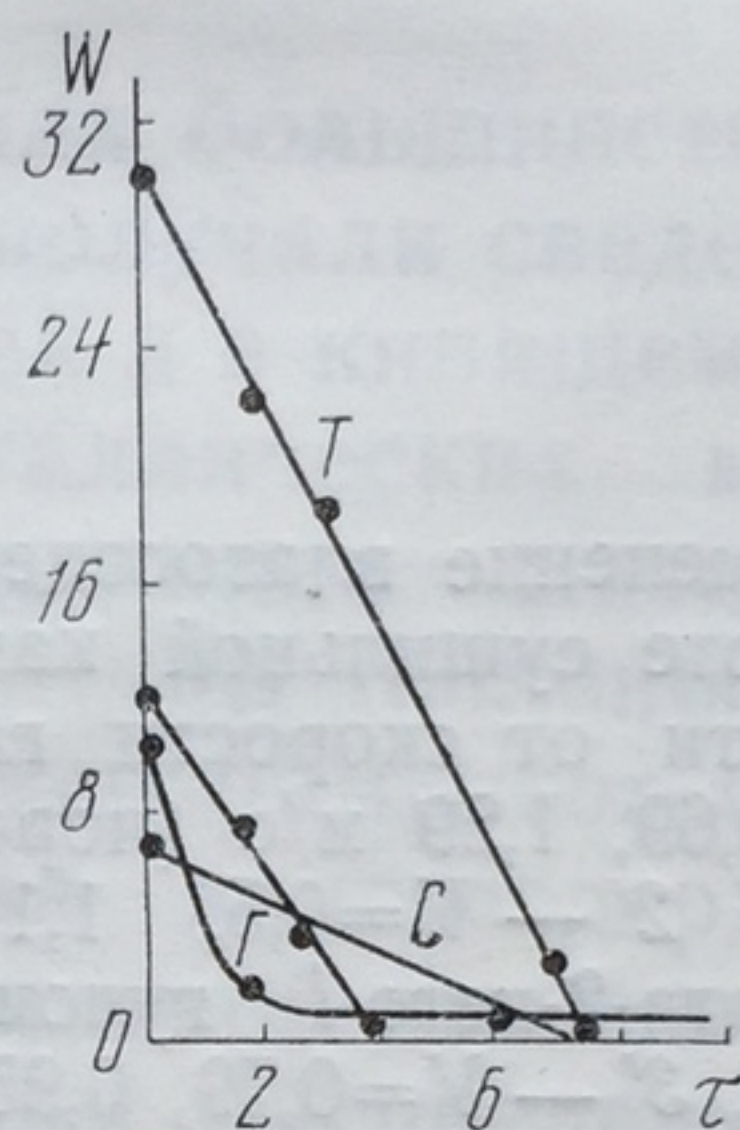


Рис. 55. Кривые сушки: *Г* — гидрат; *С* — сорбоза; *Т* — тетрациклин

Как правило, температура плавления является тем пределом, который определяет температуру воздуха, идущего на сушку, а технологические требования диктуют необходимость работы с жесткой или мягкой грануляцией, или с просеиванием.

На рис. 54—59 представлены кривые сушки для некоторых материалов [96, 97, 106, 107]. Опыты по снятию кривых были проведены для нахождения оптимальных параметров сушки и выявления ее особенностей.

Из большого многообразия факторов, влияющих на кинетику процесса сушки, нами были выбраны основные: температура входящего сушильного агента, его скорость и нагрузка на удерживающую решетку (высота плотного слоя). Здесь следует отметить, что все эксперименты рассматривают квазистатический процесс сушки, т. е. когда перепады влагосодержания и температуры внутри отдельных частиц и гранул ничтожно малы, так что их

средние интегральные значения равны локальным, в том числе и значениям на поверхности материала. Эти допущения корректно выполняются для всех кристаллических материалов, размер кристаллов которых не превышает 500 мкм, однако они допустимы и для гранул, максимальный размер которых 2 мм. Для выявления зависимости температуры входящего воздуха скорость его выбиралась равной скорости, соответствующей для дан-

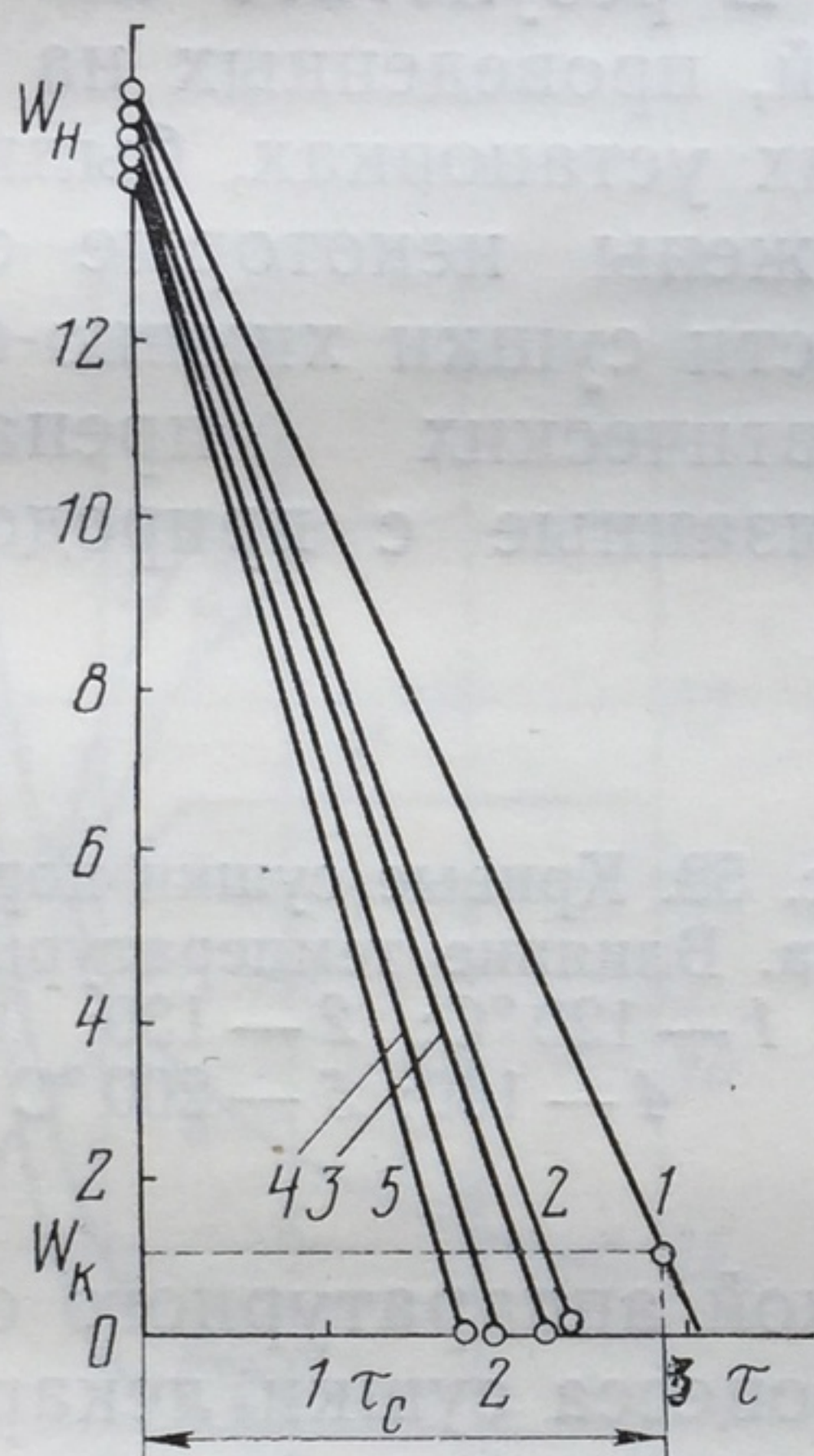


Рис. 56. Кривые сушки амидопирин. Влияние температуры воздуха. 1 — 80 °C; 2 — 115; 3 — 87; 4 — 100; 5 — 90 °C

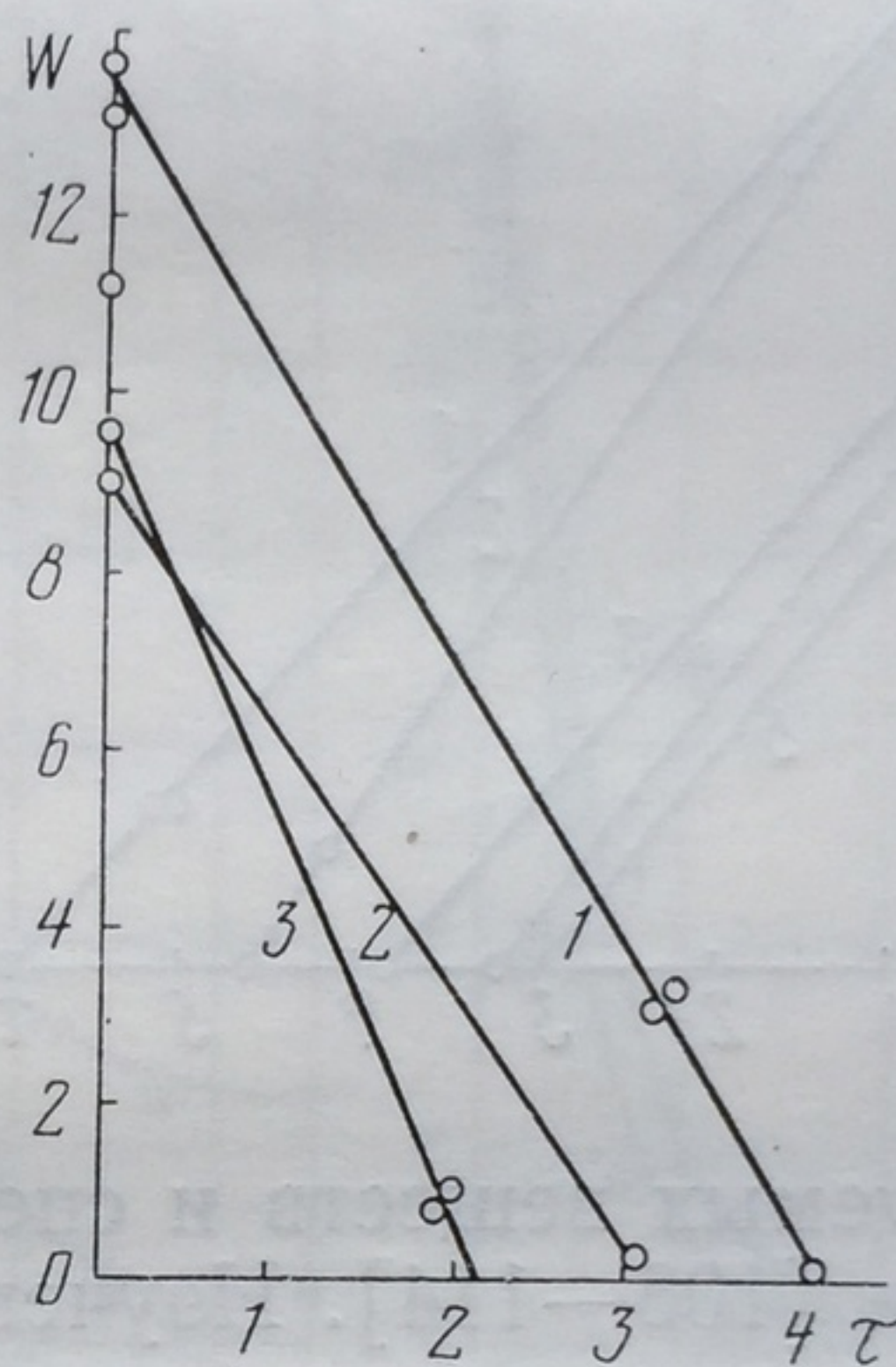


Рис. 57. Кривые сушки амидопирин. Влияние скорости воздуха: 1 — 0,83 м/с; 2 — 0,69; 3 — 1,35 м/с

ного материала началу стадии развитого кипения. Конечное влагосодержание для группы материалов с близкой энергией связи влаги со структурой (кристаллические, кристаллоколлоидные) есть функция указанных параметров для одного и того же способа сушки. Поэтому появилась возможность статистически обработать материал и найти единую зависимость, которая имеет вид:

$$W_k = af_1(W_H)f_2(t_B)f_3(v\rho)f_4\left(\frac{G}{F}\right) =$$

$$\approx 44,72W_H^{0,93}t_B^{-0,95}v\rho^{-0,3}\left(\frac{G}{F}\right)^{-0,67}. \quad (45)$$

Формула достаточно точна в указанных пределах, ошибка не составляет более 20% (см. приложение 1 табл. 6).

Однако для наиболее точных расчетов надо пользоваться программой АНИПР, с помощью которой рассчитывается конечное влагосодержание материала при определенных исходных параметрах процесса. Постановка этой программы описана ниже, а вспомогательный материал — в приложении 2.

В результате исследований, проведенных на пилотных установках, были обнаружены некоторые особенности сушки химико-фармацевтических препаратов, связанные с природой ис-

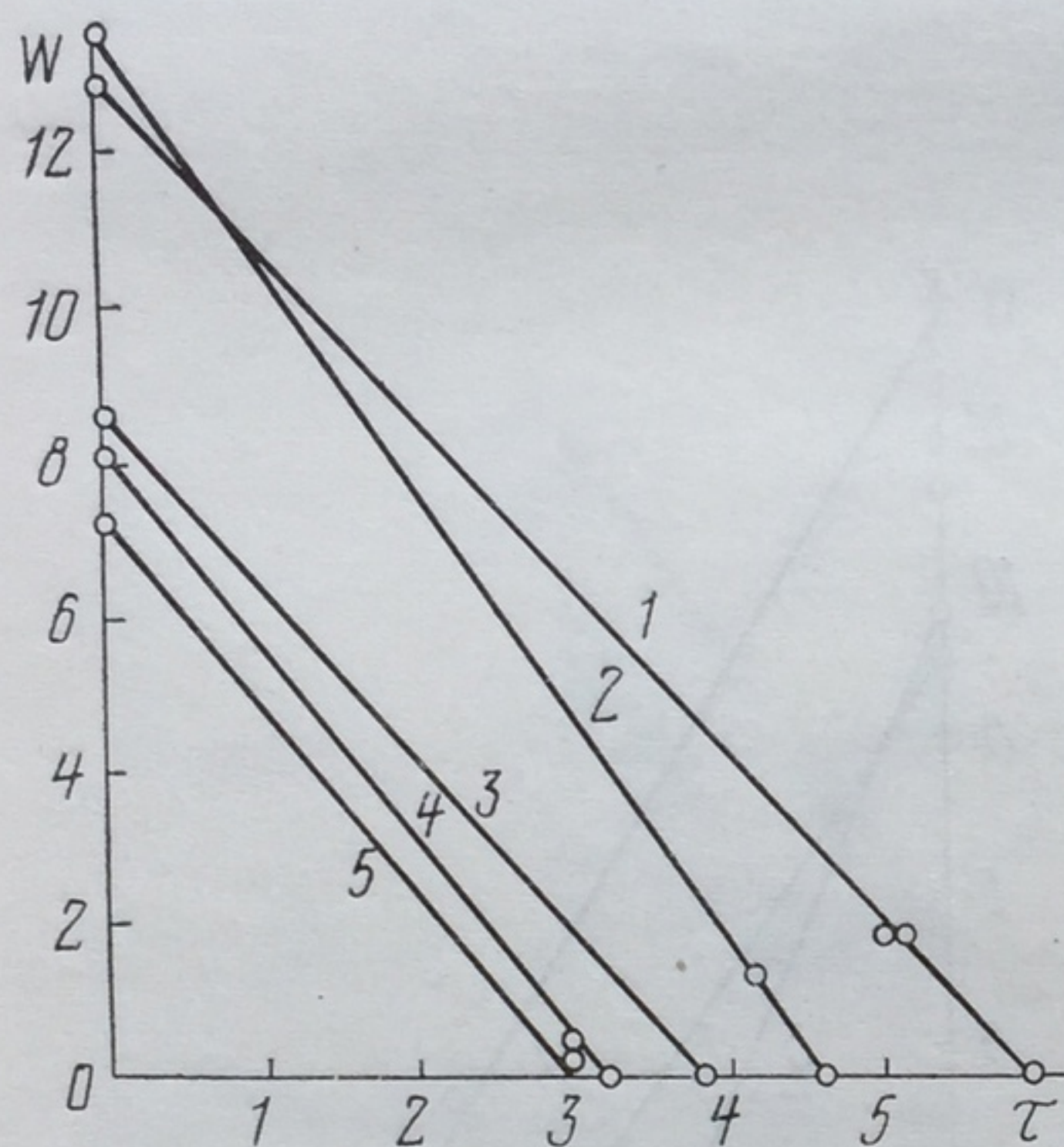


Рис. 58. Кривые сушки норсульфазола. Влияние температуры воздуха: 1 — 120 °C; 2 — 130; 3 — 140; 4 — 160; 5 — 200 °C

следуемых веществ и спецификой аппаратного оформления [108—114]. Изучение процесса сушки лекарственных препаратов на пилотных установках непрерывного действия показало высокую равномерность высушивания материала.

Считают, что недостаток сушки материалов при непрерывном процессе в кипящем слое — широкий разброс времени его пребывания в слое, и следовательно, большая неравномерность высушивания. Однако опытные данные ряда работ показали вполне достаточную равномерность сушки в аппарате кипящего слоя [109, 110, 116, 117]. На рис. 60, 61 показано изменение влажности пирамидина и барбитуровой кислоты. Из опытов видно, что влагосодержание выгружаемого материала практически мало изменяется и колебания во влагосодержании являются функцией режимных параметров. Так, например, для барбитуровой кислоты неравномерность конечного влагосодержания зависит от нагрузки материала на распределительную решетку, скорости и температуры ожижающего агента. При увеличении слоя

до 180 мм влагосодержание в процессе сушки изменялось на 5—20% от среднеинтегрального значения, а при высоте слоя 100 мм разброс возрастал до 15—30%. При оптимальных режимных параметрах расхождение во влагосодержании составляло не более 10—20% (рис. 61).

При исследовании процесса сушки химико-фармацевтических препаратов была обнаружена подобная равномерность для всех препаратов при принятом аппаратурном оформлении. В случаях, когда характеристическое

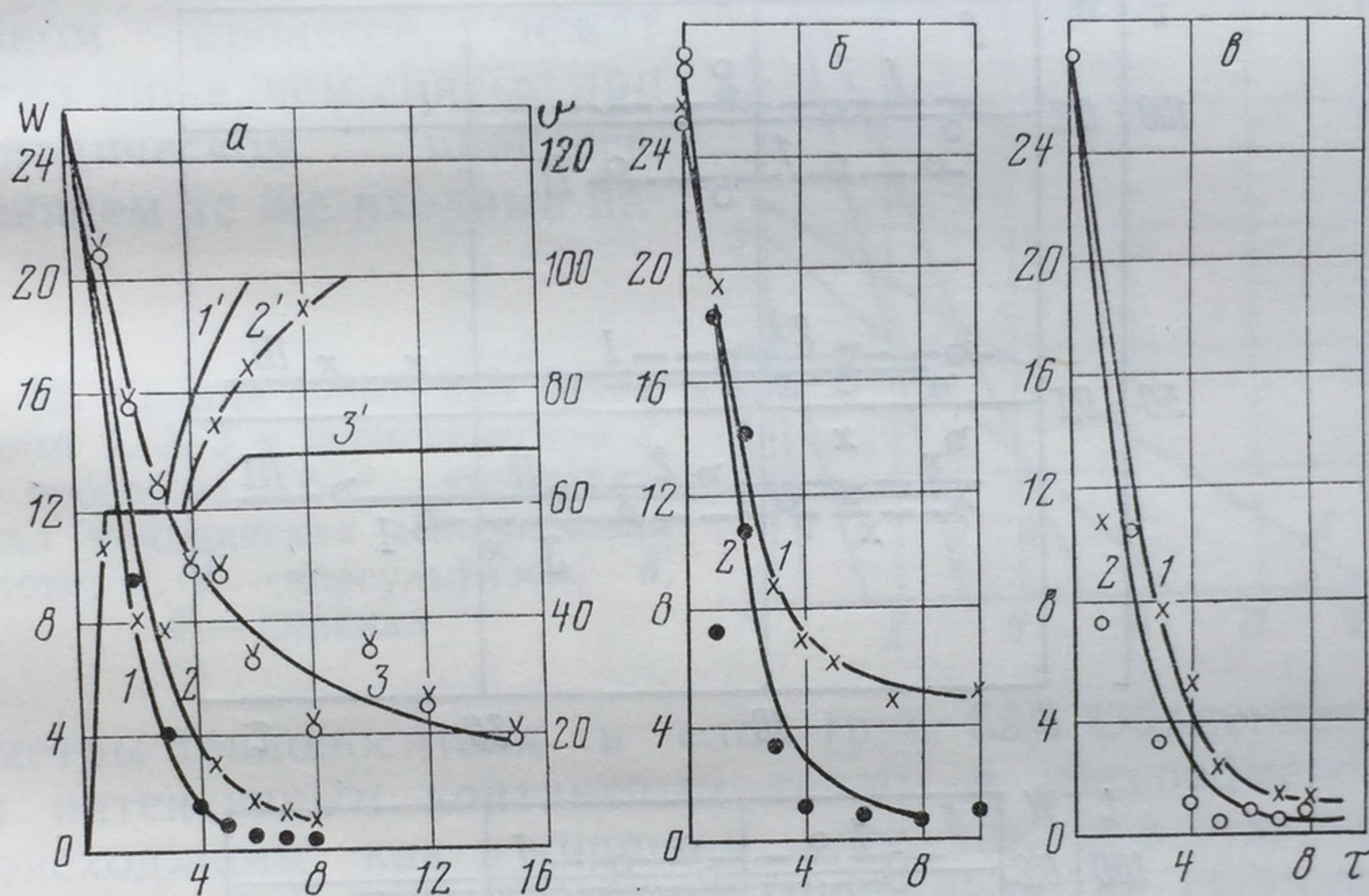


Рис. 59. Кривые сушки (1, 2, 3) и нагрева (1', 2', 3') фтивазида и пиперазина при различных нагрузке материала, скорости сушильного агента и температуре: *a* — $v\rho=0,96 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$, $t=140^\circ\text{C}$, $\sigma/F=10$ (1), $\sigma/F=14$ (2), $\sigma/F=26,25 \text{ кг/м}^2$ (3); *б* — $v\rho=0,96 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ (1), $v\rho=1,36 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$, $t=140^\circ\text{C}$ (2); *в* — $t=130^\circ\text{C}$ (1); $t=144^\circ\text{C}$; $\sigma/F=14 \text{ кг/м}^2$, $v\rho=0,96 \text{ кг/м}^2\cdot\text{с}$ (2)

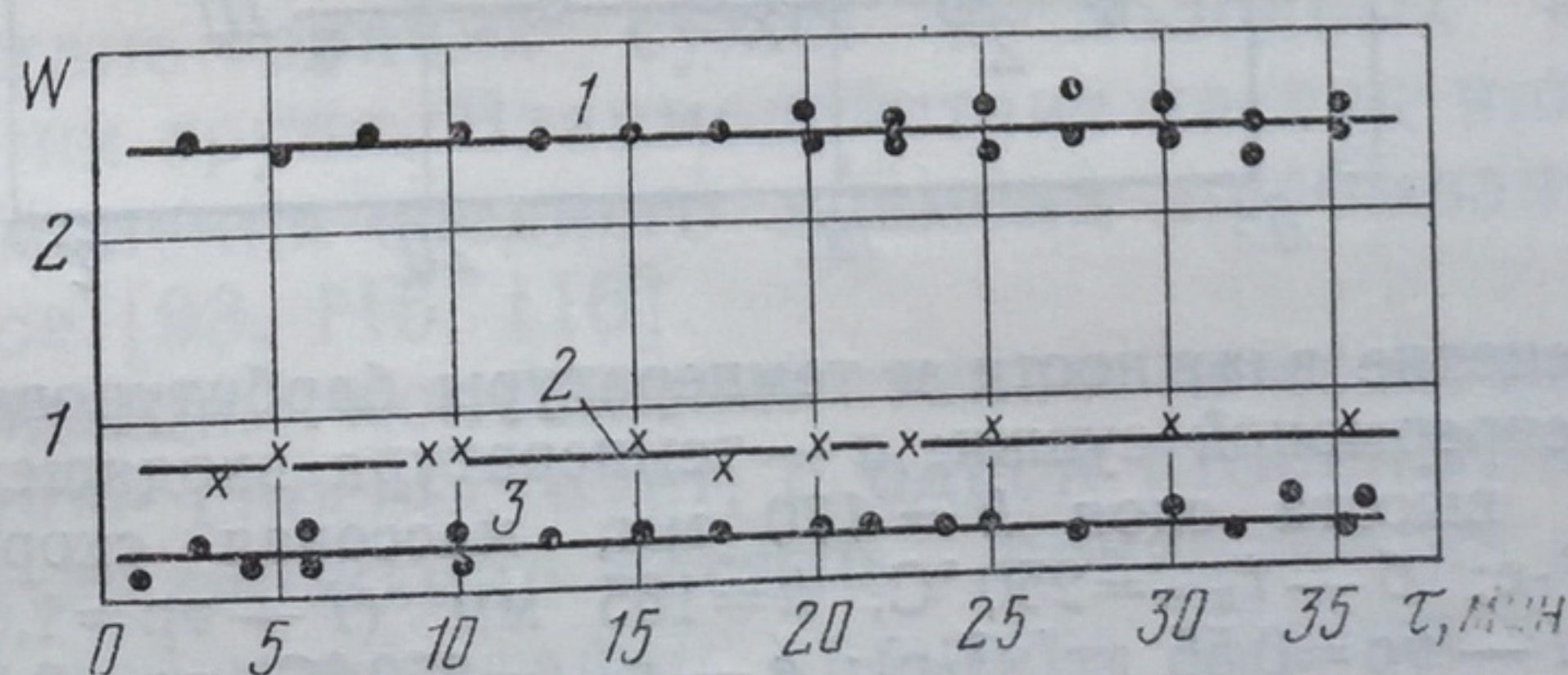


Рис. 60. Изменение влажности пирамеина в процессе непрерывной сушки: 1 — высота плотного слоя 70 мм; 2 — 100; 3 — 120 мм

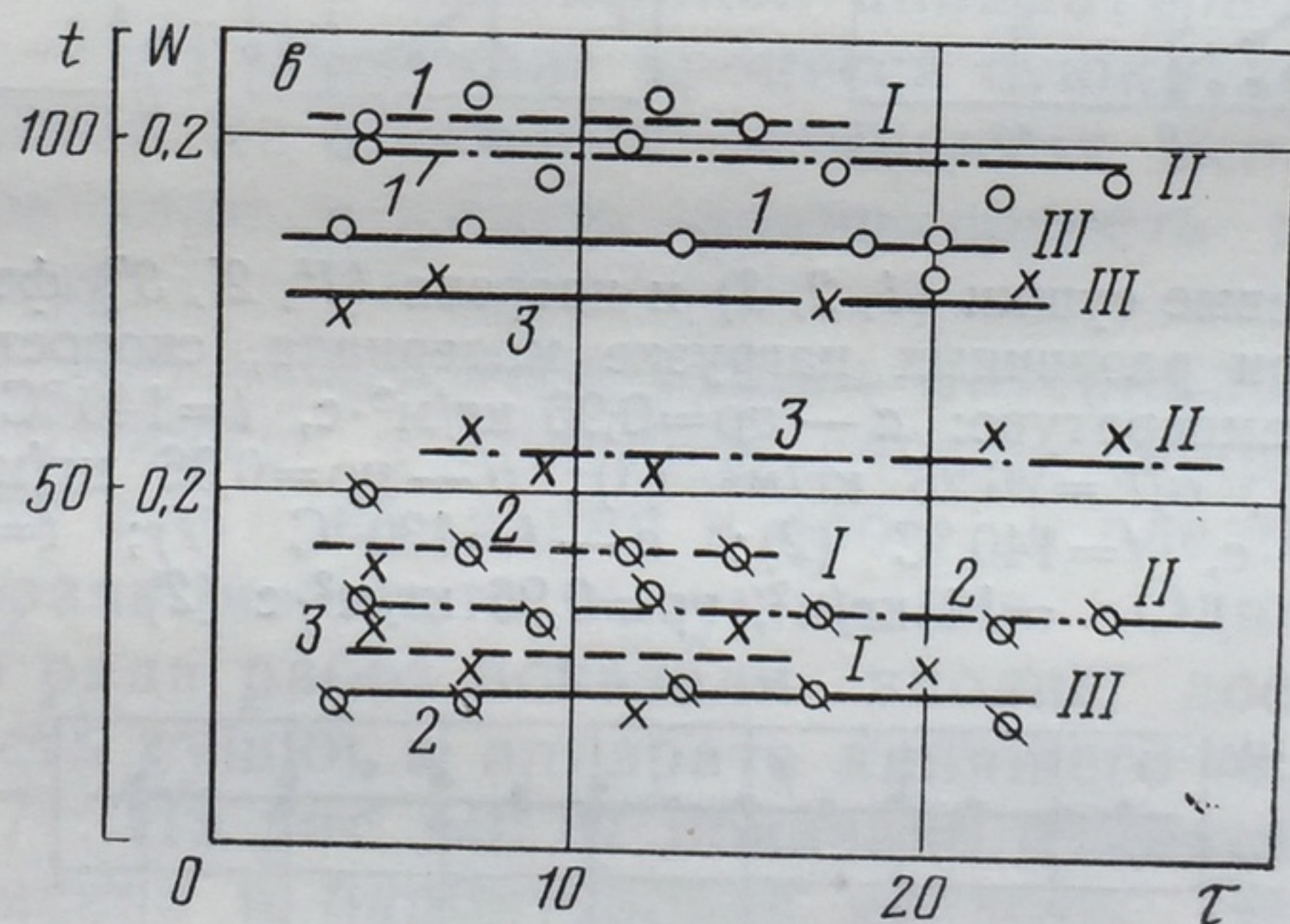
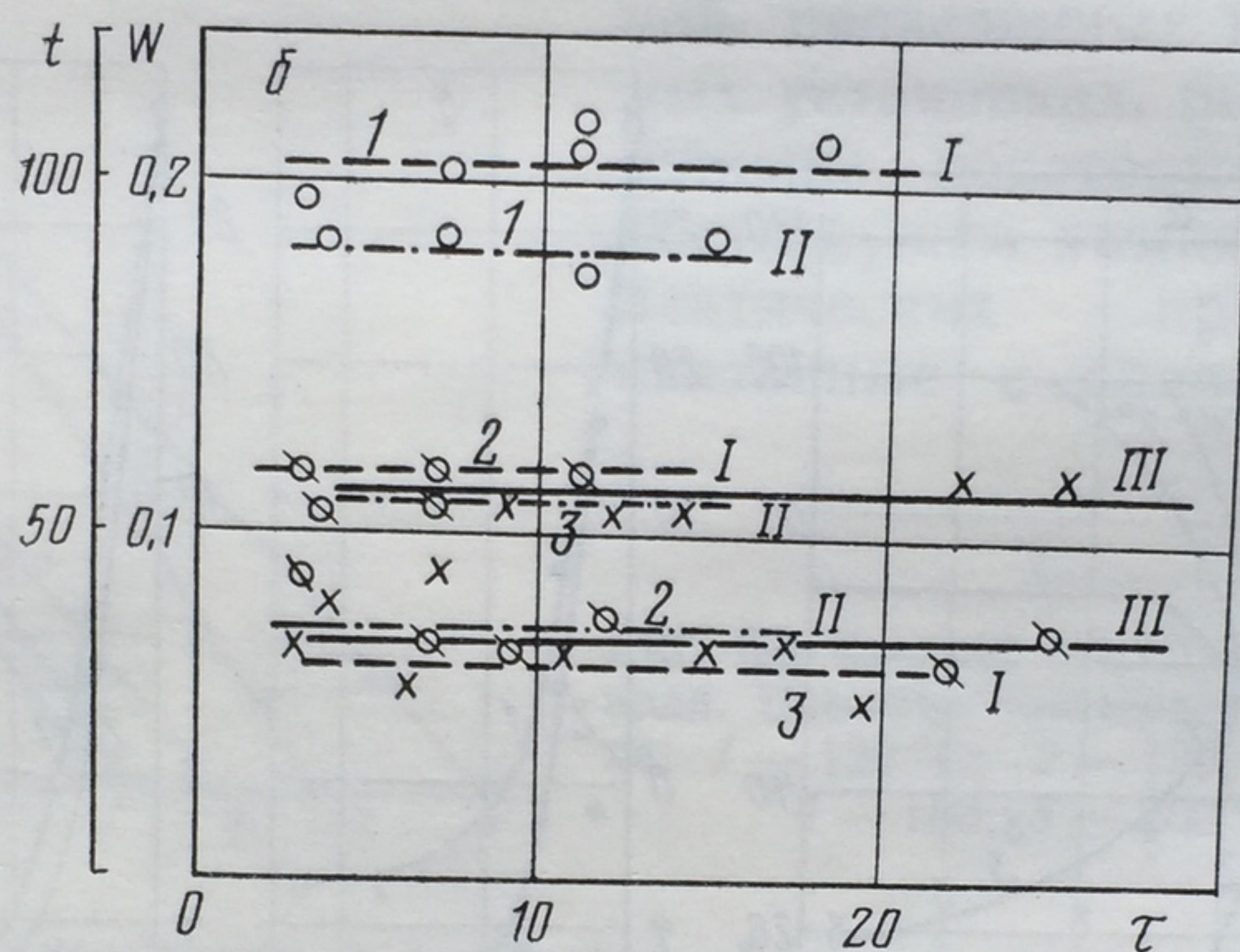
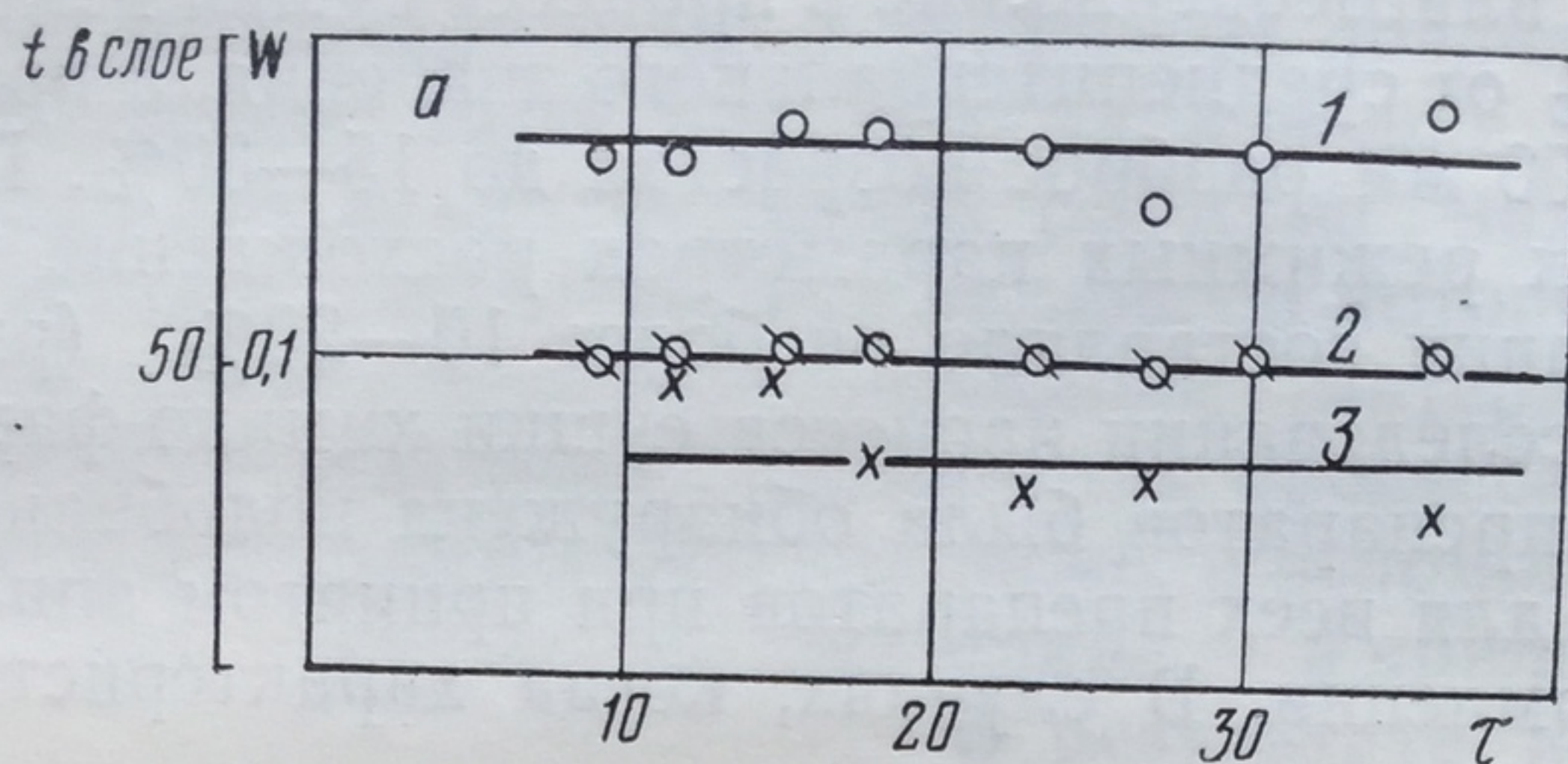
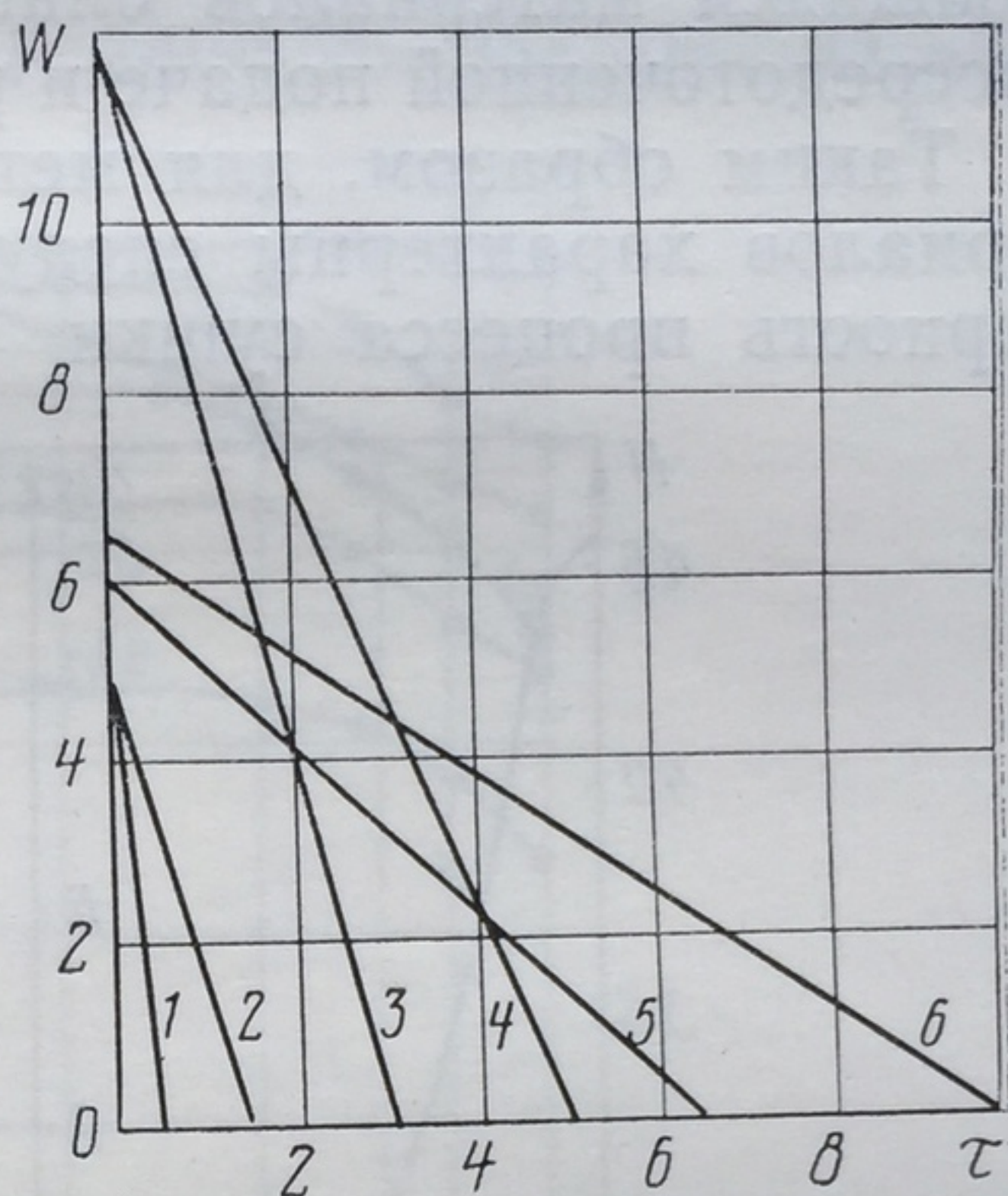


Рис. 61. Изменение влажности и температуры барбитуровой кислоты в процессе непрерывной сушки: а — температура входящего воздуха $t_{в.в} = 200^\circ\text{C}$, высота слоя $h = 170$ мм, массовая скорость $v_p = 0,805$ кг/м²·с; б — $t_{в.в} = 250^\circ\text{C}$, $h = 185$ мм (I — $v_p = 1,08$ кг/м²·с, II — $0,805$, III — $v_p = 0,55$ кг/м²·с); в — $t_{в.в} = 250^\circ\text{C}$, $v_p = 0,805$ кг/м²·с (I — $h = 100$ мм, II — 150 , III — 180 мм): 1 — температура в слое; 2 — температура на выходе из сушильной камеры; 3 — влагосодержание материала

время кинетики процесса удаления жидкости было соизмеримо или превышало среднерасходное время пребывания материала в аппарате, в отдельно взятой пробе наблюдалась бóльшая неравномерность. Однако она выравнивалась в течение нескольких минут, находясь в изолированном стакане-бюксе, и результат по отдельным пробам несколько сглаживался.

Нами, как и в [93], обнаружено, что кривые сушки, полученные при непрерывном процессе, лежат всегда ниже, чем снятые при периодическом процессе, имеющем те же входные па-

Рис. 62. Кривые сушки при непрерывном 1, 3, 5 и периодическом 2, 4, 6 процессах: 1, 2 — кристаллическая медицинская аскорбиновая кислота; 3, 4 — норсульфазол; 5, 6 — пиранал



раметры теплоносителя и слоя (рис. 62). Объясняется это интенсивным контактным тепло- и массообменом, происходящим как в кипящем слое, так и в отдельно взятых пробах после выгрузки материала из сушилки. В этом случае общепринятая модель массопереноса по схеме взаимодействия газ — частицы не полностью отражает сущность процесса. Здесь необходимо учитывать статистические закономерности системы, образованной множеством эффективно перемешанных гранул. На передачу тепла и массы значительное влияние оказывает взаимодействие горячих сухих и холодных влажных частиц или их групп. Взаимодействие частиц нивелирует влияние изменения среднего времени пребывания материала в слое [93, 115, 116].

Происходящий контактный тепло- и массообмен в данном случае способствует, с одной стороны, выравниванию влагосодержания частиц, покидающих аппарат, с другой — интенсификации процесса переноса тепла и массы в слое.

Исследование контактного тепло- и массообмена по методике, описанной выше, показало значительную ин-

тенсивность его для медицинских препаратов. Так, например, для пирамеина при оптимальных режимах время завершения процесса (время контакта) 0,009 ч.

По предложенному методу возможны тепловая обработка материала при более высоких температурах из-за предварительного его подогрева в падающем слое и достаточная стабильность псевдоожижения даже слипающихся материалов благодаря сушке на «подушке», рассредоточенной подаче и работе мешалки внутри слоя.

Таким образом, для метода тепловой обработки материалов характерны следующие преимущества: равномерность процесса сушки в однокамерном аппарате;

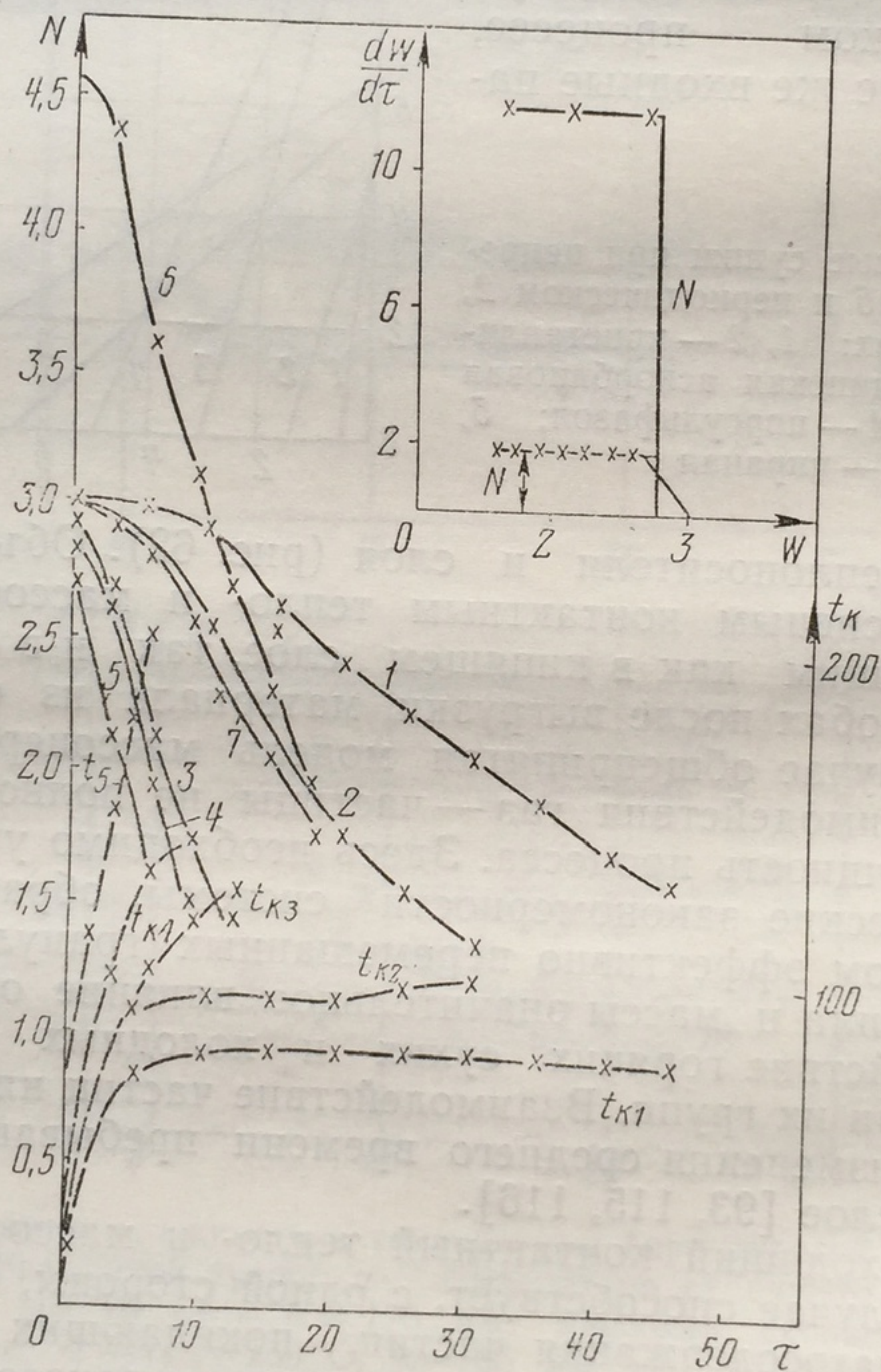


Рис. 63. Кривые кинетики сушки и температурные кривые в контактном слое при кондуктивной сушке Са-соли хлортетрациклина, $H=6$ мм, $W=75\%$: 1 — температура греющей поверхности 100°C ; 2 — 150; 3 — 200; 4 — 250; 5 — 300; 6 — 300 ($H=10$ мм); 7 — 400°C

интенсификация
массообмена
зовым тепло
турой (как
ления) бла
ла в падающ
Метод су
риалов, кото

Рис. 64. Кривые
при $t_n=100^\circ\text{C}$ в
лина. Расстановк

дуктивного и
ла. Исследова
кондуктивной
лина выполнял
рис. 37) [117].
Как видно
процесс кондук
протекает при
ла. Температур
чем внешних сл

интенсификация процесса за счет контактного тепло- и массообмена; возможность обрабатывать материалы газовым теплоносителем с максимально высокой температурой (как правило, на 5—10 °С ниже температуры плавления) благодаря предварительному подогреву материала в падающем слое.

Метод сушки высоковлажных, пастообразных материалов, который был нами предложен, состоит из кон-

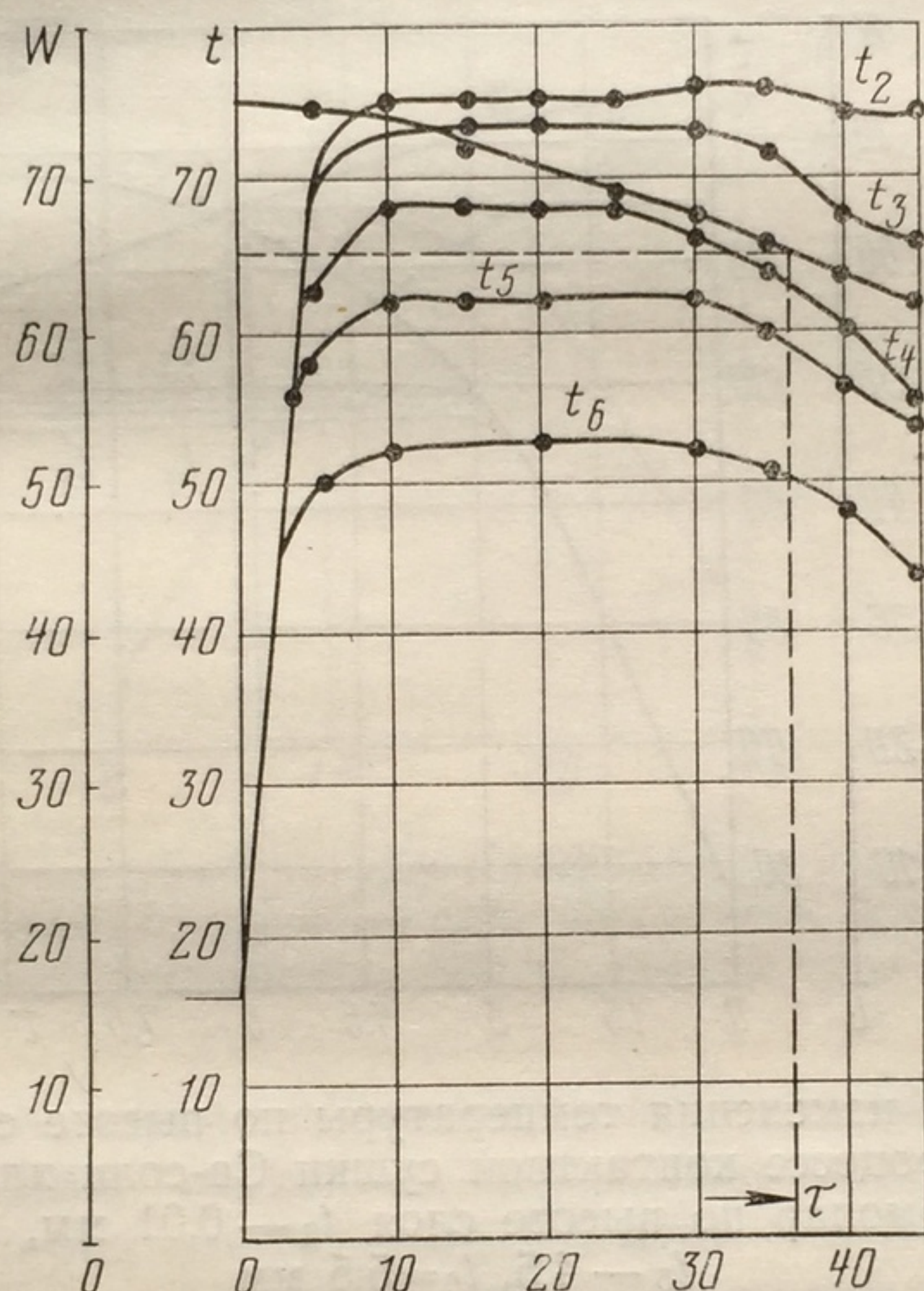


Рис. 64. Кривые изменения температуры по высоте слоя ($H=6$ мм при $t_n=100$ °С) в процессе контактной сушки Са-соли хлортетрациклина. Расстановка термодпар по высоте слоя $t_2—0,01$ мм, $t_3—0,5$, $t_4—3$, $t_5—4,5$, $t_6—5$ мм

дуктивного и радиационно-конвективного подводов тепла. Исследование механизма тепло- и массообмена при кондуктивной сушке на примере Са-соли хлортетрациклина выполнялось на установке, описанной выше (см. рис. 37) [117].

Как видно из температурных кривых (рис. 63—65), процесс кондуктивной сушки Са-соли хлортетрациклина протекает при наличии градиента температуры материала. Температура контактного слоя значительно выше, чем внешних слоев материала, и зависит от t греющей по-

верхности. В течение определенного времени температура держится на одном уровне, после чего происходит одновременное ее падение во всех слоях образца и повышение в контактном слое.

При контактировании влажных материалов типа Са-соли хлортетрациклина с греющей поверхностью обеспечивается плотный контакт благодаря пластическим свойствам влажного материала, который при низких

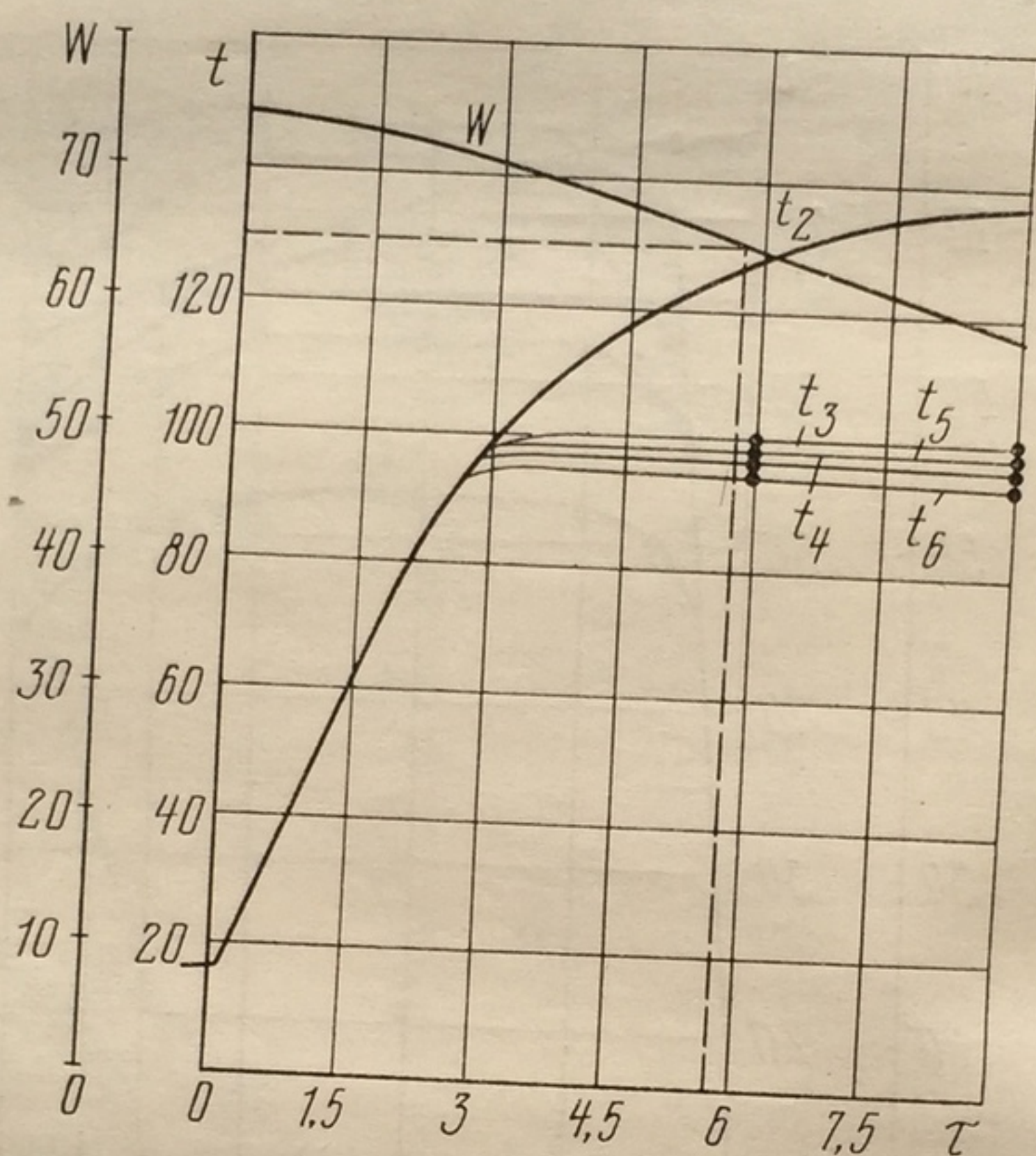


Рис. 65. Кривые изменения температуры по высоте слоя ($H=6$ мм, $t_n=250^\circ\text{C}$) в процессе контактной сушки Са-соли хлортетрациклина. Расстановка термодатчиков по высоте слоя $t_2=0,01$ мм, $t_3=0,5$, $t_4=3$, $t_5=4,5$, $t_6=5,5$ мм

температурах греющей поверхности ($<100^\circ\text{C}$) сохраняется, и температура контактного, центральных и поверхностных слоев остается практически постоянной (рис. 64). С увеличением температуры греющей поверхности ($150\text{--}300^\circ\text{C}$) вследствие парообразования наблюдается скачок температуры в контактном слое (рис. 65). Образовавшийся пар уменьшает фактическую площадь соприкосновения, что приводит к местному поднятию материала и возникновению паровоздушной прослойки (рис. 66).

Следовательно, контактное термическое сопротивление в первом периоде создается эффективной паровоздушной прослойкой, средняя толщина которой (δ_v), как показывают расчеты, сильно зависит от температуры

греющей п
300 °C — 1
При ра
что образ
через мат
В резуль
в контак
верхности

Рис. 66. Измен
слои (δ_v) в
Ю

толщина про
равное 1,5 м
132 мкм, а че
тически за 3
вается. При
личивается
температура
ры греющей
ность использ
Для Са-со
тура 190 °C, в
гическая акти
плавиться. Сл
контактном с
рактирующей
пературу грею
Исследован
кондуктивной

греющей поверхности (при 100°C достигает 77 мкм, при 300°C — 155 мкм).

При рассмотрении кинетики процесса сушки видно, что образовавшийся в контактном слое пар отводится через материал, углубляя зону испарения (рис. 66). В результате толщина прослойки паровоздушной среды в контактном слое сокращается. Так, при греющей поверхности 300°C и высоте канавки 6 мм после прогрева

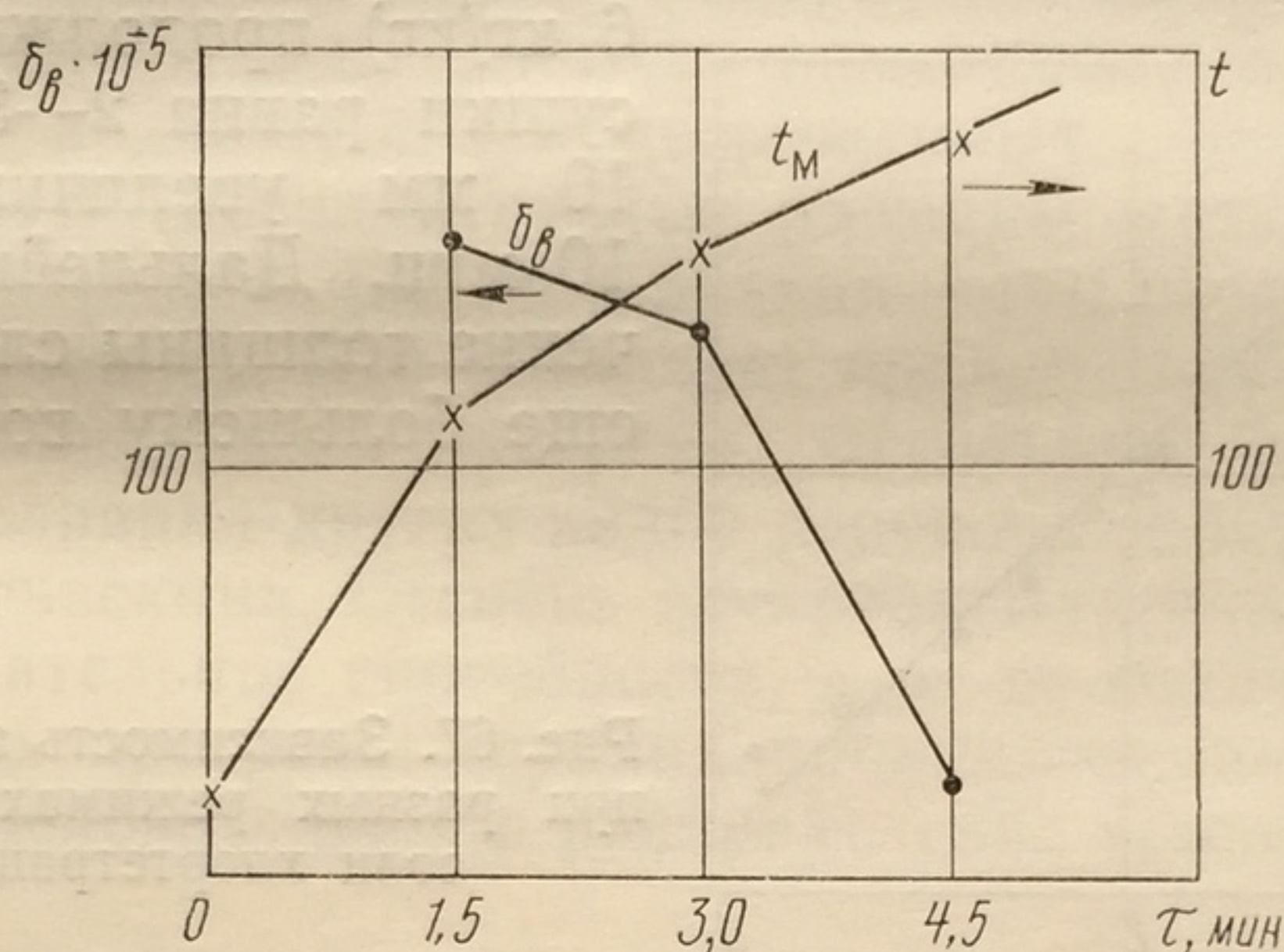


Рис. 66. Изменение температуры материала t_m и паровоздушной прослойки (δ_b) в контактирующем слое во времени при температуре греющей поверхности 300°C , высоте слоя 6 мм

толщина прослойки составляет 155 мкм. За время сушки, равное 1,5 мин, толщина прослойки уменьшается до 132 мкм, а через следующие 1,5 мин — в 6 раз, т. е. практически за 3 мин контактный слой полностью обезвоживается. При уменьшении толщины прослойки резко увеличивается температура материала. Таким образом, температура материала и ее зависимость от температуры греющей поверхности позволяют определить возможность использования метода контактной сушки.

Для Са-соли хлортетрациклина предельная температура 190°C , выше этой температуры изменяется биологическая активность материала, а при 200°C он начинает плавиться. Следовательно, температура материала в контактном слое — один из основных параметров, характеризующих качество продукта и определяющих температуру греющей поверхности.

Исследование механизма тепло- и массообмена при кондуктивной сушке и анализ температурных и кинети-

ческих кривых сушки показали, что оптимальной температурой греющей поверхности, при которой происходит интенсивная сушка Са-соли хлортетрациклина и сохраняется качество готового продукта, является температура греющей поверхности, равная 300 °С.

Большое влияние на длительность сушки оказывает толщина слоя высушиваемого материала. При толщине слоя 6 мм ($t_{гр.п} = 300\text{ °С}$ и $u = 2,8—3\text{ кг/кг}$ до $u = 1,5—6\text{ кг/кг}$) продолжительность сушки равна 2—3 мин, при 10 мм увеличивается до 10 мин. Дальнейшее увеличение толщины слоя ведет к еще большему возрастанию

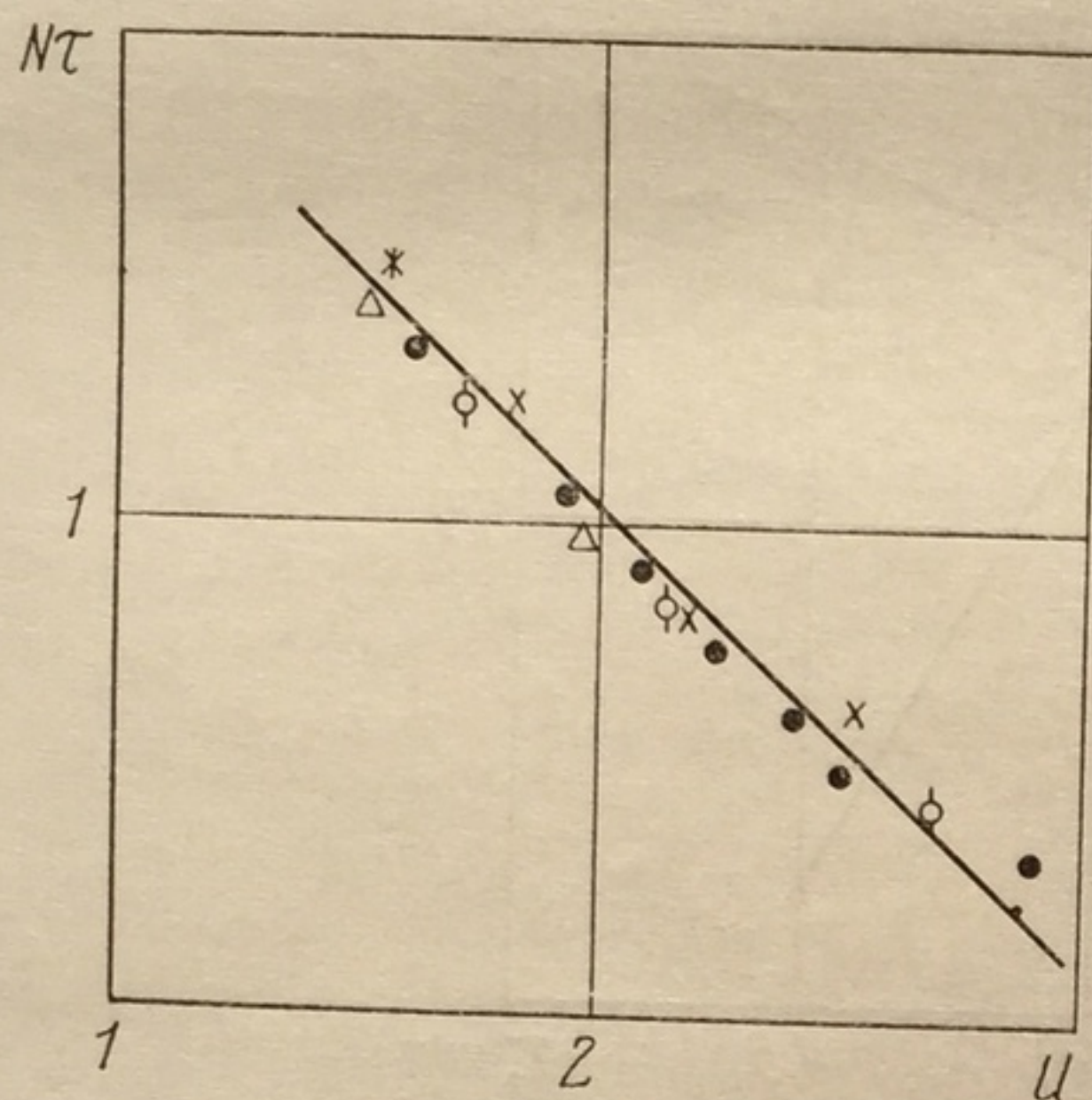


Рис. 67. Зависимость $u_n—u_k$ от $N\tau$ при разных режимах сушки Са-соли хлортетрациклина

длительности сушки. Оптимальной толщиной слоя, обеспечивающей требуемую производительность, является 6 мм. Значительное влияние на время сушки оказывает начальное влагосодержание.

Кривые сушки, полученные при разных режимах и обработанные по методике Красникова, дают единую обобщенную кривую сушки в координатах ($u_n—u_k$), $N\tau$ (рис. 67) [118—120].

Общая длительность процесса определяется из уравнения

$$\tau = \frac{u_n - u_k}{N}, \quad (46)$$

где $N = f(t_{гр.п}, h_{сл}, u)$.

Вторая ступень в сушилке для пастообразных материалов предусматривает радиационный подвод тепла к падающему дисперсному материалу.

Наиболее выгодным является радиационный нагрев в движущихся дисперсных системах невысокой концентрации. Здесь высокая эффективность определяется осо-

бенностями переноса радиационной энергии [85, 87, 91, 92]. Наиболее важные из них: перенос энергии из явления поверхностного превращается в объемное; свойство материала, т. е. истинная поглощательная способность определяет процессы внутреннего тепло- и массообмена.

Процессы переноса энергии в таких системах сложны, и взаимосвязь ряда факторов выявляется решением двух задач: внешнего переноса энергии и внутреннего распространения ее в отдельных объектах поглощения (частицах, гранулах и т. д.). Методы радиационной обработки материала в движущихся разреженных средах имеют общие черты (незначительные размеры материала, малую концентрацию частиц в реакционном объеме и кольцевое облучение). Это позволяет предположить возможность радиационного прогрева отдельных частиц без сильного влияния других видов переноса — теплопроводности и конвекции. Степень прогрева материала зависит от поглощательной способности, а от ее величины — интенсивность прогрева, глубина проникновения ИК-излучения, а следовательно, и распределение температуры по сечению.

Большинство процессов, происходящих при радиационном обогреве, сопровождается фазовыми и физико-химическими процессами. Знание особенностей внутреннего тепломассопереноса в отдельной частице в этом случае необходимо для выявления методов интенсификации и управления технологическими процессами.

До настоящего времени нет аналитического решения этого вопроса. Известный закон Бугера не может быть использован, так как описывает ослабление плотности лучистого потока внутри тела за счет рассеяния и поглощения, не учитывает процессов массообмена. Поэтому важное значение имеет экспериментальное исследование внутреннего тепло- и массопереноса в отдельной частице.

Для выполнения поставленных целей была разработана и смонтирована специальная экспериментальная установка [121, 122].

Методика проведения эксперимента заключалась в том, что из исследуемого материала приготавливали две одинаковые гранулы диаметром 3—6 мм. В одну вставляли комплект термопар, а в другую — стеклянную державку. Обе частицы одновременно вводили в рабочую камеру, режимные параметры которой были стабилизи-

рованы. Частица со стеклянной державкой подвешивалась к аналитическим весам, приспособленным для непрерывной фиксации убыли влаги, а частицы с термопарами крепились к держателю. Контроль за изменением убыли веса частицы, запись температур материала и сопротивление датчика производили одновременно, измерение и запись температуры по сечению гранулы — с помощью осциллографа К-12-22. По окончании процесса термообработки частица из камеры вынималась и изучались ее поверхность, структура и размеры.

Исследования проводились с гранулами трех медицинских препаратов Са-соли хлортетрациклина ($w=50-70\%$), таблеточной массы амидопирина ($w=15-20\%$) и норсульфазола ($w=20-35\%$). Все эти препараты термолабильны, обладают селективными свойствами и поглощают излучение практически в одних и тех же областях спектра $400-1800\text{ см}^{-1}$. Наиболее выгодная зона термической обработки $413-443\text{ К}$.

Комплекс испытаний в диапазоне изменения режимных параметров (температура излучателя $338-453\text{ К}$, влагосодержание материала $10-70\%$, диаметр гранул $3-6\text{ мм}$) показал значительное влияние ИК-излучения на внутренние процессы переноса тепла и влаги, характер термограмм, структурообразование материала, общую интенсивность и длительность обезвоживания.

Особый интерес представлял анализ термограмм процесса, так как по ним можно судить о глубине проникновения ИК-излучения в вещество и о температурном поле внутри частицы.

Из анализа термограмм (рис. 68—70) видно, что проницаемость в процессе термообработки изменялась. Так, в начале процесса наблюдался безградиентный прогрев гранул размером $3-6\text{ мм}$, независимо от свойств исследуемых материалов скорость прогрева составляла $283-353\text{ К/мин}$ и определялась интенсивностью теплового потока и поглощательной способностью гранул. В момент, когда теплообмен осложнялся массообменом, появлялся градиент температуры по сечению гранулы. Наличие градиента в данных условиях указывало на изменение пропускательной способности вещества. После окончания процесса массообмена градиента температуры не было.

Как известно, в изменении пропускательной способности в процессе массообмена существенную роль игра-

ют такие факторы, удаляя материал, удаляя усредненную сухую материю, диаметр которой не изменялся, количество структуры материала, катальную способность.

Из анализа термограмм (рис. 68) видно, что на температуру гранулы, превышающую 2 мм , в глубине 2 мм $353-368\text{ К}$. Та же температура среды дачи тепла разра. Значи

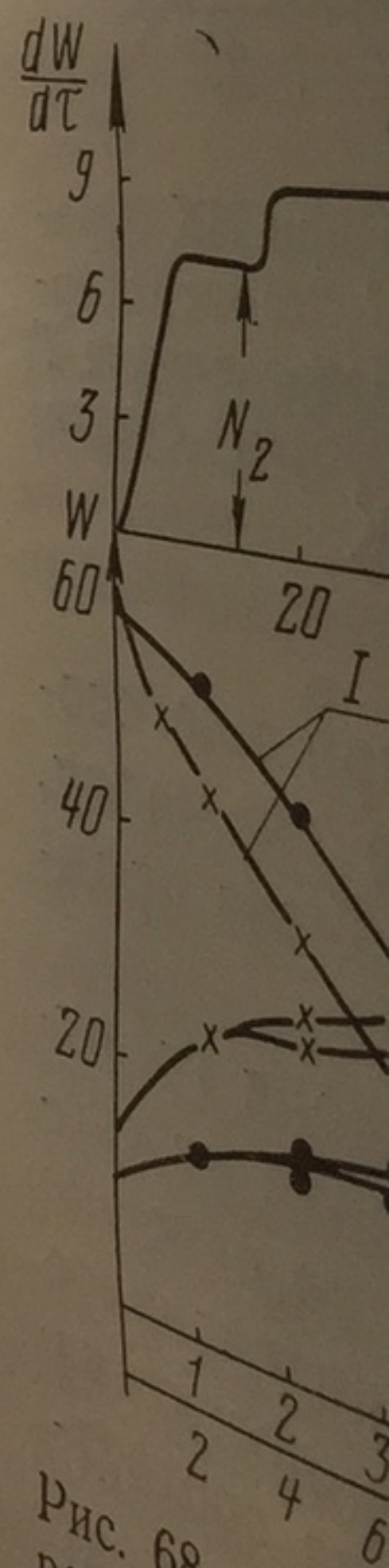


Рис. 68. Термограммы гранул в процессе термообработки. I — температура гранулы, II — температура среды ($T_{\text{ср}} = 417\text{ К}$); б —

ют такие факторы, как оптические свойства сухого материала, удаляемой жидкости и структуры материала. Усредненная по спектру поглощательная способность сухого материала и удаляемой жидкости (воды) в исследуемом диапазоне длин волн $400\text{--}1800\text{ см}^{-1}$ практически не изменялась. Однако при удалении влаги уменьшалось количество поглощенной энергии и изменялась структура материала, что значительно влияло на пропускательную способность исследуемых объектов.

Из анализа температурных кривых Са-соли хлортетрациклина (рис. 68, б) видно, что в процессе массообмена температура слоев, расположенных на глубине 1—2 мм, превышала температуру поверхностного слоя и на глубине 2 мм за сравнительно короткое время достигла $353\text{--}368\text{ К}$. Такая температура не могла быть достигнута ни за счет естественной конвекции, так как температура среды не превышала $313\text{--}328\text{ К}$, ни за счет передачи тепла кондукцией через поверхностный слой образца. Значит, единственным источником повышения

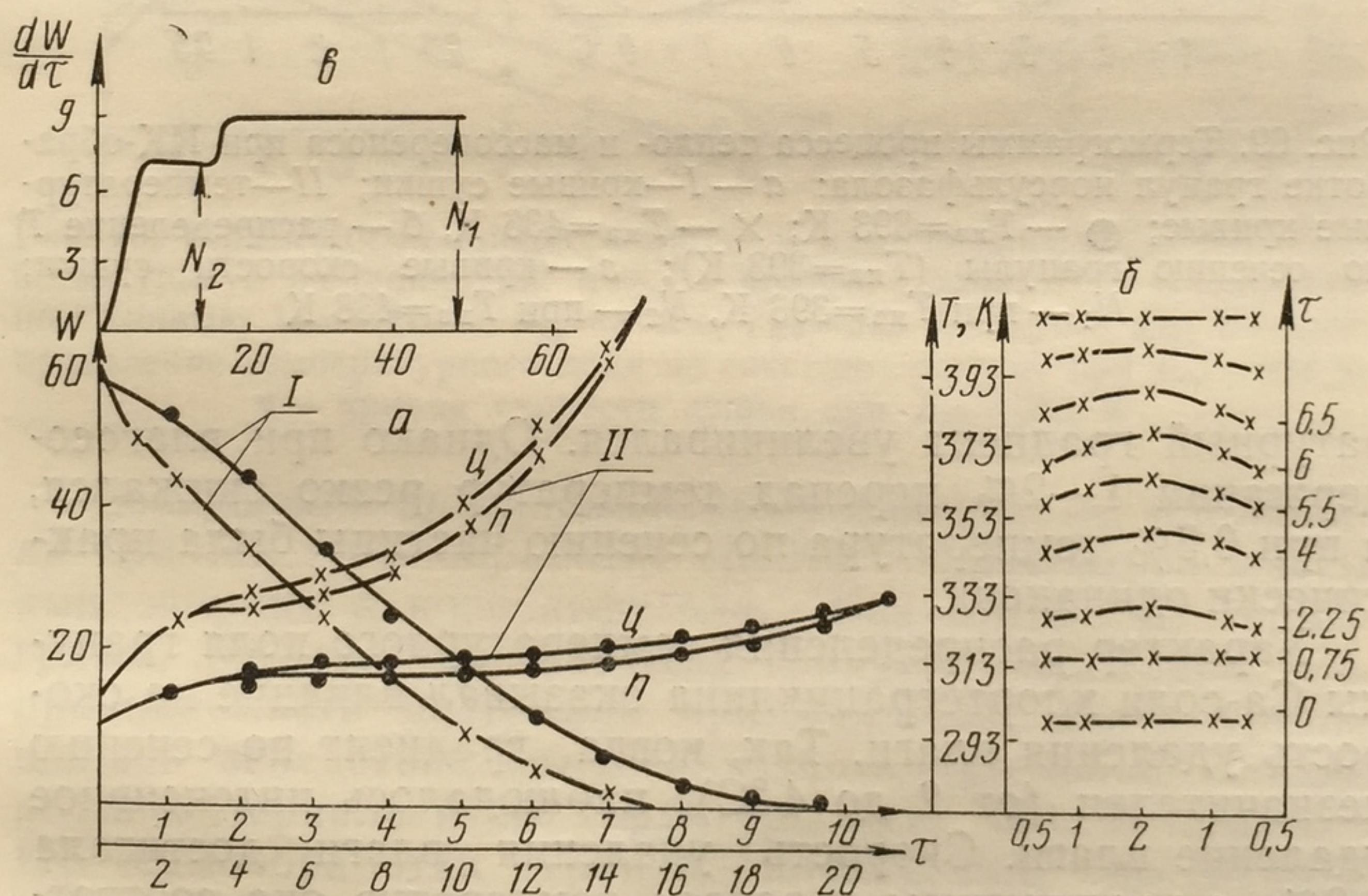


Рис. 68. Термограммы процесса тепло- и массопереноса при ИК-обработке гранул Са-соли хлортетрациклина: а — I — кривые сушки; II — температурные кривые (п — температура на поверхности гранулы, ц — температура в центре гранулы, ● — $T_{из} = 393\text{ К}$; × — $T_{из} = 417\text{ К}$); б — распределение температуры по сечению гранулы; в — кривая скорости сушки

температуры на глубине 2 мм являлось поглощение лучистой энергии и охлаждение поверхностных слоев в результате отдачи тепла в окружающую среду. Причем в процессе удаления влаги материал приобретал пористую жесткую структуру, усадки при этом не наблюдалось. Это создавало предпосылки для увеличения проницаемости при снижении влагосодержания. Со временем темпе-

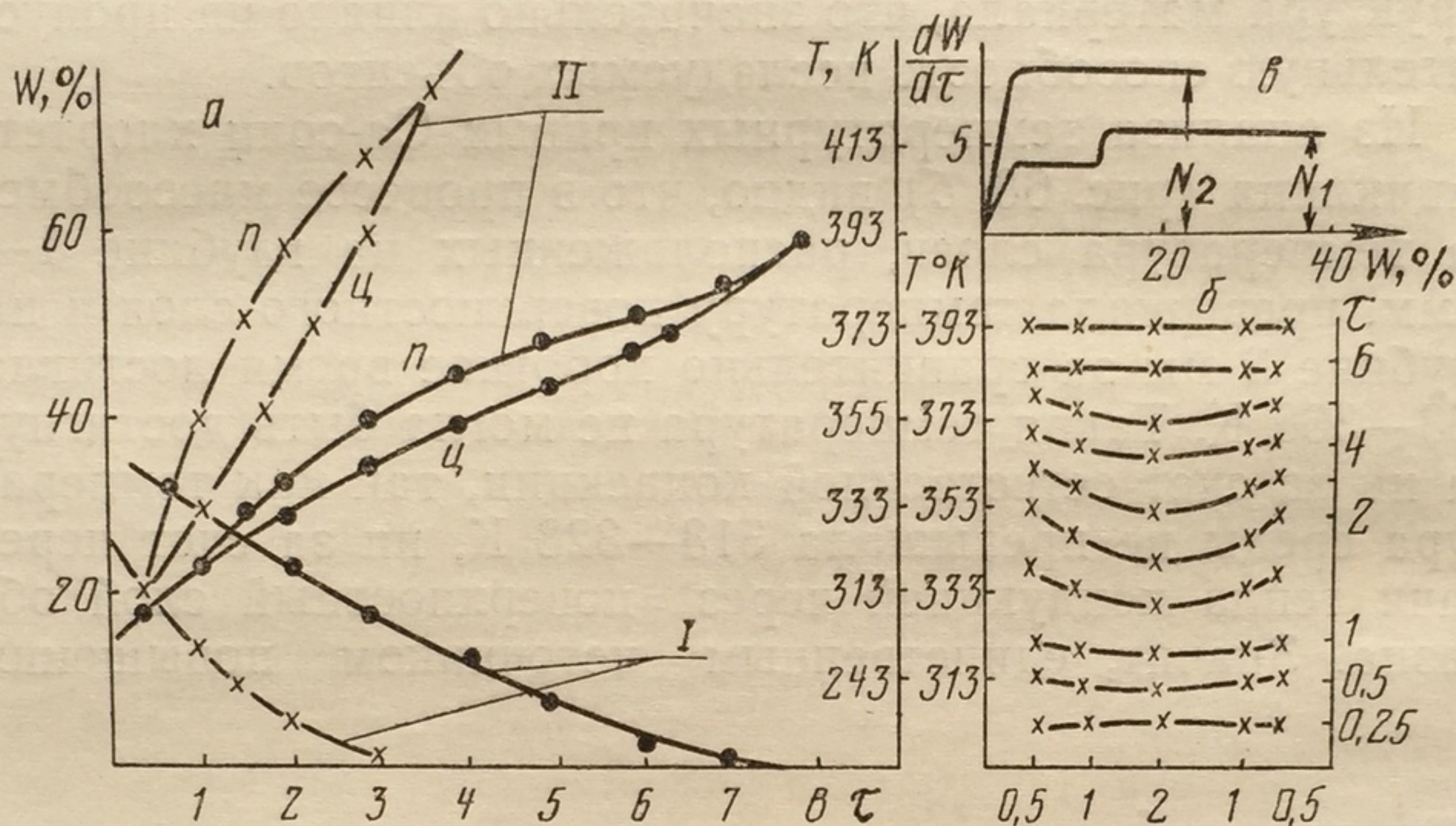


Рис. 69. Термограммы процесса тепло- и массопереноса при ИК-обработке гранул норсульфазола: *a* — *I* — кривые сушки; *II* — температурные кривые; ● — $T_{из} = 393$ К; × — $T_{из} = 436$ К, *б* — распределение T по сечению гранулы ($T_{из} = 393$ К); *в* — кривые скорости сушки; N_1 — при $T_{из} = 393$ К, N_2 — при $T_{из} = 438$ К

ратурный градиент увеличивался. Однако при влагосодержании 1—2% перепад температур резко снижался, а при 0,5% температура по сечению частицы была практически одинакова.

Характер распределения температурного поля гранулы Са-соли хлортетрациклина оказывал влияние на скорость удаления влаги. Так, когда градиент по сечению незначителен (от 2 до 4 °С), наблюдалось интенсивное удаление влаги. Скорость удаления влаги достигала 8,8%, с увеличением перепада температур она соответственно снижалась.

Как видно из рис. 68, *a*, *в*, темп удаления влаги различный и зависит от температуры излучателя и поглощательной способности материала. Так, при температуре излучателя 338 К скорость удаления влаги значительно

ниже, чем при
чительного те
способности
вышение тем
453 К при
ния влаги,
разрушению

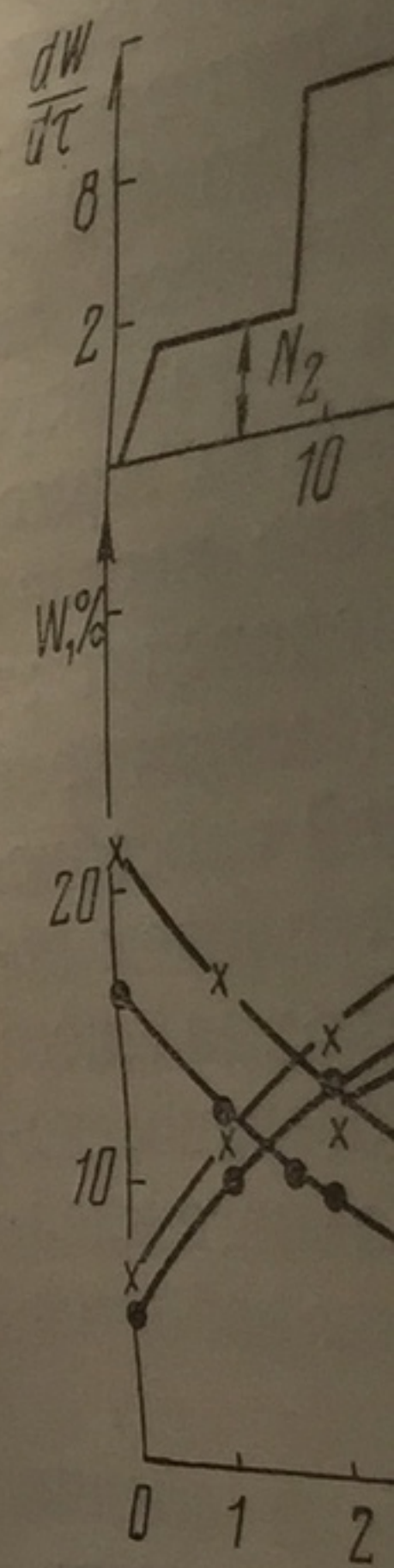


Рис. 70. Термограммы процесса тепло- и массопереноса при ИК-обработке гранул норсульфазола: *a* — кривые сушки; *б* — температурные кривые; *в* — распределение температуры по сечению гранулы

Соверше
ли при ИК-
амидопирин
грамм, темп
проницаемо
шалась всл
ности матер
ИК-термооб
крахмально
сти гранул
мость ИК-л
ря на интен
чилась и те

ниже, чем при 443—453 К. Это происходит за счет незначительного теплового потока и низкой поглощательной способности в диапазоне длин волн 400—1800 см⁻¹. Повышение температуры источника излучения выше 443—453 К приводит к резкому увеличению скорости удаления влаги, температурных и влажностных градиентов и разрушению гранул.

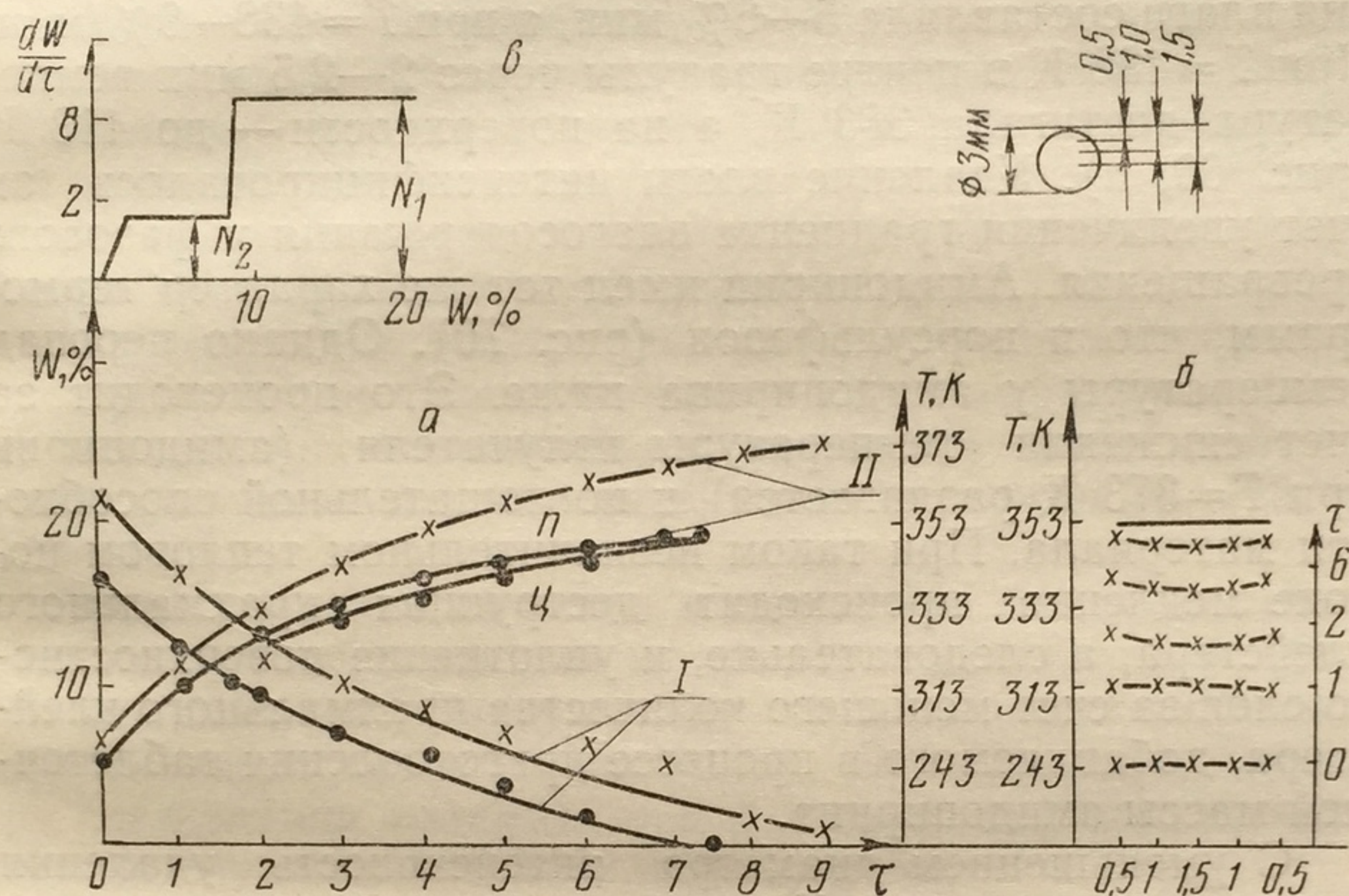


Рис. 70. Термограммы процесса тепло- и массопереноса при ИК-обработке гранул амидопирина: а — *I* — кривые сушки; *II* — температурные кривые; $T_{из} = 363$ К, $d_{гр} = 3$ мм; $T_{из} = 373$ К, $d_{гр} = 5$ мм; б — распределение температурного поля по сечению гранулы при $T_{из} = 363$ К; в — кривая скорости сушки при $T_{из} = 363$ К

Совершенно противоположную картину мы наблюдали при ИК-термообработке гранул таблеточной массы амидопирина и норсульфазола. Как видно из термограмм, температура к центру гранулы снижалась, т. е. проницаемость материала при удалении влаги уменьшалась вследствие изменения поглощательной способности материала и его структуры (рис. 69). В процессе ИК-термообработки гранул происходила деструкция крахмального клейстера, в результате чего на поверхности гранул образовывалась плотная корка и проницаемость ИК-лучей резко снижалась. В этом случае, несмотря на интенсивное удаление влаги, проницаемость увеличилась и температурный градиент возрос с повышением

температуры поверхностных слоев. Чем выше температура излучателя, тем быстрее образуется плотный поверхностный слой, а следовательно, и температурный градиент. Интенсивность удаления влаги, несмотря на образование плотного поверхностного слоя, с увеличением температуры излучателя росла.

Как видно из рис. 69, в, при $T=393$ К скорость удаления влаги составляла 5—6%/мин, а при $T=438$ —9%/мин. При $T=438$ К в центре гранулы через 2—2,5 мин температура достигала 383 К, а на поверхности — до 413 К (рис. 69, а). Удаление влаги интенсифицировалось за счет увеличения градиента влагосодержания и фазового превращения. Амидопирин имел тот же характер термограмм, что и норсульфазол (рис. 70). Однако перепад температуры у амидопирин ниже. Это происходит за счет снижения температуры излучателя (амидопирин при $T=373$ К разлагается) и поглощательной способности материала. При таком незначительном тепловом потоке медленно происходит деструкция крахмального клейстера, а следовательно, и уплотнение поверхностного слоя за счет меньшего количества крахмального клейстера, добавляемого в процессе приготовления таблеточной массы амидопирин.

С уменьшением диаметра интенсивность удаления влаги увеличивается. Характер распределения температурных полей по сечению гранулы остается тот же, что позволило сделать заключение о правомерности переноса полученных данных на процесс термообработки более мелких гранул (1—2 мм), имеющих место в реальных аппаратах.

Проведенный комплекс исследований показал, что гранулы размером 1—6 мм в процессе ИК-обработки, не осложненном массообменом, прогреваются во всем объеме без градиента температур, а интенсивность и длительность процесса зависят от свойств материала и их изменения в процессе термообработки.

3.4. ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРЕДЛОЖЕННЫХ МЕТОДОВ СУШКИ И АЛГОРИТМЫ ИХ РАСЧЕТОВ

Сушка различных материалов, как правило, является недетерминированным, стохастическим процессом, поэтому стационарные и нестационарные процессы

непрерывной сушки
состояниях могут
дами.

Эффективность
планирования экс
сов сушки опреде
ческой основой дл
исследовать лишь

В настоящее в
оптимального мет
ным требованиям,
но для разных г
данных не учитыв

Для получения
водству одной из
ние алгоритмов, п
сушки широкого к
[123—125].

Процессы пере
шенном состоянии
как режимные па
определяющих пр
при составлении
должны служить

**Теоретические пр
процесса сушки в
и кипящем слое**

Как б
кипящего слоя п
позволила получ
ствующих улучш
ции тепломассоп
гоотдачи для ра
части сушильной
ные материалы п
ному закону.

Впервые иссл
падающими твер
были проведены
интенсивность п
оказалась значи

непрерывной сушки во взвешенном и полувзвешенном состояниях могут быть рассчитаны статистическими методами.

Эффективность применения статистических методов планирования экспериментов при исследовании процессов сушки определяется тем, что они могут быть методической основой для изучения ситуаций, которые можно исследовать лишь экспериментально.

В настоящее время существующие методики выбора оптимального метода сушки не удовлетворяют современным требованиям, так как расчеты проводятся укрупненно для разных групп материалов и из-за отсутствия данных не учитываются их свойства.

Для получения более надежных рекомендаций производству одной из первоочередных задач является создание алгоритмов, позволяющих определить возможности сушки широкого класса материалов с помощью ЭВМ [123—125].

Процессы переноса тепла и массы при сушке во взвешенном состоянии зависят от многих факторов, таких, как режимные параметры процесса и комплекс величин, определяющих природу материала. Эти группы величин при составлении математической модели процесса сушки должны служить вводными параметрами.

Теоретические предпосылки описания процесса сушки в падающем и кипящем слое

Как было показано, комбинация падающего и кипящего слоя при одновременной влажной грануляции позволила получить ряд преимуществ процесса, способствующих улучшению качества материала, интенсификации тепломассопереноса и т. д. Изучение процесса влагоотдачи для различных материалов в вертикальной части сушильной камеры показало, что все исследованные материалы на высоте до 2 м отдают влагу по линейному закону.

Впервые исследования теплообмена газа со свободнопадающими твердыми частицами неправильной формы были проведены Д. Н. Ляховским, в результате которых интенсивность переноса тепла к падающим частицам оказалась значительно выше, чем к закрепленным в тех

же условиях. Более поздние работы подтвердили результаты Д. Н. Ляховского для условия падающих частиц [126—128].

Интенсивность теплообмена в падающем слое описывается одной кривой, которая практически соответствует турбулентности всего пограничного слоя у частиц, и определяется по уравнению

$$Nu = 0,2 Re^{0,82}. \quad (47)$$

Образование турбулентности пограничного слоя в данном случае происходит при меньшей затрате энергии. Однако использование выражения (47) для случая, когда изменяется масса материала, требует отдельных оценок. Это связано с тем, что изменение массы (влагоотдача) влияет на скорость падения частиц. Для выяснения этого была сформулирована задача определения скорости с переменной массой [129]. В нашем случае имеем ряд допущений, упрощающих задачу. Прежде всего следует учесть, что масса, получаемая принудительным гранулированием, состоит практически из однородных частиц, форма которых вполне определена и представляет собой цилиндры размерами l и d . Наименьший размер гранул, определяемый технологией процесса, составляет $2 \cdot 10^{-3}$ мм.

Движение как сухих, так и влажных частиц в данном случае происходит в автомодельной области, где $c = \text{const}$, и практически без соударений друг с другом и со стенками канала. Учитывая это, рассмотрим движение одной частицы характерного размера с переменной массой (влажная частица) в вертикальном канале и сравним с движением частиц с постоянной массой (сухой).

Необходимо определить скорость частицы с переменной массой. Напомним, что закономерность удаления жидкости известна из эксперимента. Сушка лекарственных и витаминных препаратов в падающем слое происходит в период постоянной скорости.

Уравнение, описывающее движение, запишем следующим образом:

$$M \frac{dv_m}{dt} + v_m \frac{dM}{dt} = F, \quad (48)$$

где t — время; v_m — скорость частицы; M — переменная

масса частицы; m —
чае $M - M(t) = \frac{m}{t}$

где c — коэффициент
стицы; u_n — начальная
сушки; u_r — удельная
скорость частицы.
Подставив (49)

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{B}{A - v}$$

Уравнение (52) заме

можно привести к в

$$y' = y^2$$

Для всех практиче
зовании данного ме
степенью точности

Заменяя $y' =$

$$y =$$

и полагая

окончательно полу

масса частицы; m — масса сухой частицы. В данном случае

$$M - M(t) = \frac{m(100 + u_n)}{100} - \frac{mN}{100} t = A - Bt, \quad (49)$$

$$F = Mg - Pc, \quad (50)$$

$$Pc = \frac{1}{2} c d^2 \gamma_r v_0^2 = \alpha' v_0^2, \quad (51)$$

где c — коэффициент сопротивления; d — диаметр частицы; u_n — начальное влагосодержание; N — скорость сушки; γ_r — удельный вес среды; v_0 — относительная скорость частицы.

Подставив (49) и (51) в уравнение (48), получим

$$\frac{dv_0}{dt} = \frac{B}{A - Bt} (v_0 - v_r) + g - \frac{\alpha'}{A - Bt} v_0^2. \quad (52)$$

Уравнение (52) заменой переменных

$$v_0 = \frac{A - Bt}{\alpha'} y + \frac{B}{\alpha'} \quad (53)$$

можно привести к виду

$$y' = y^2 - \frac{B\alpha'v_r}{(A - Bt)^2} - \frac{g\alpha'}{A - Bt}. \quad (54)$$

Для всех практически возможных случаев при использовании данного метода $A \gg Bt$, а значит, с достаточной степенью точности уравнение (54) можно записать

$$y' = y^2 - \frac{B\alpha'v_r - g\alpha'A}{A^2} = 0. \quad (55)$$

Заменяя

$$y = \frac{\sqrt{g\alpha'A - B\alpha'v_r}}{A} + \frac{1}{z},$$

$$y' = -\frac{1}{z^2} z'$$

и полагая

$$M = \sqrt{g\alpha'A - B\alpha'v_r},$$

окончательно получаем

$$v_0 = \frac{A - Bt}{\alpha'} \left\{ \frac{V\bar{M}}{A} + \frac{2 V\bar{M} (B + V\bar{M})}{(B - V\bar{M}) A e^{-\frac{2 V\bar{M}}{A} t} - A(B + V\bar{M})} \right\} + \frac{B}{\alpha'} \quad (56)$$

Как видно, из рис. 71, скорость влажных частиц изменяется в сравнении с сухой частицей, однако оно насту-

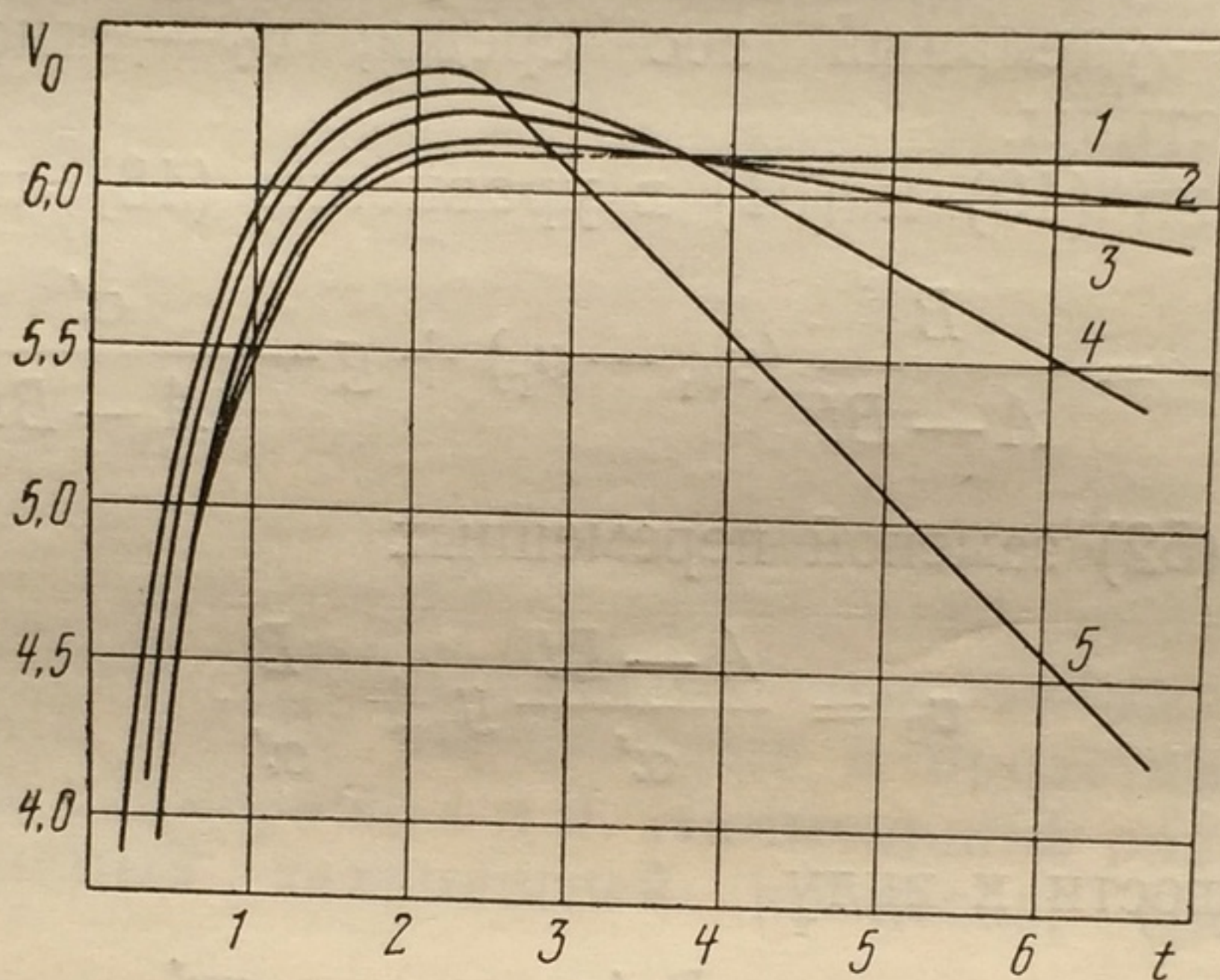


Рис. 71. Зависимость относительной скорости v_0 кг/м².с от времени t , с: 1 — влагосодержание 0%; 2 — 5; 3 — 10; 4 — 20; 5 — 30%

пает не сразу и наиболее резко выражено для частиц, имеющих начальное влагосодержание более 30%. Так, кривая 1 соответствует изменению скорости сухой частицы, кривые 2, 3, 4 имеют отличия, которые начинают сказываться на длине канала более 2 м.

Анализ полученных данных позволил сделать вывод о том, что для расчета аппаратов, работающих в режиме падающей насадки без комбинации с кипящим слоем, когда высота колонны составляет более 2 м, и использующих материал с влагосодержанием более 30%, необходимо учитывать изменение скорости. Высота сушильной камеры может определяться по формуле

$$H = \frac{V\bar{M}}{A\alpha'} \left(At - \frac{B}{2} t^2 \right) +$$

21
+ —————
(B - V\bar{M}) A e
которая получен
= \int_0^t V_m dt, а V_m =

Изменения ск
госодержание до
рованном методе,
лики и составляю
могут быть испол
частицы.

Сушка в верти
рата происходит
ху через гранулят
сечению колонны
частиц заданного
лам движется нагр

Математическая
падающем слое мо
рической диффузи
поток частиц мат
нейной скоростью
ния, вдоль которог
прямого и обратн
лении концентрации
кулярном движении
ского описания мод
изменение концент
рывной функцией
части сушильной у
каждом сечении, об
циент продольного п
Процесс описыва
ными уравнениями:

Рис. 72. Структура пот
9. Зак. 312

$$+ \frac{2 \sqrt{M}(B + \sqrt{M})}{(B - \sqrt{M}) A e^{-\frac{2 \sqrt{M}}{A} t} - A(B + \sqrt{M})} + \frac{B}{\alpha'} t - v_r t, \quad (57)$$

которая получена исходя из того, что путь H равен: $H = \int_0^t V_m dt$, а $V_m = V_0 - V_r$.

Изменения скорости для материалов, имеющих вла-
госодержание до 40%, которые используются в комбини-
рованном методе, когда высота не превышает 2 м, невелики и составляют не более 15%. Поэтому в расчетах могут быть использованы скорости витания для сухой частицы.

Сушка в вертикальной части комбинированного аппарата происходит сначала в вертикальной колонне. Сверху через гранулятор осуществляется распределенная по сечению колонны подача материала в виде гранул или частиц заданного размера. Навстречу падающим гранулам движется нагретый воздух.

Математическая модель процесса нагрева и сушки в падающем слое может быть представлена однопараметрической диффузионной моделью (рис. 72). Падающий поток частиц материала перемещается со средней линейной скоростью в вертикальном канале круглого сечения, вдоль которого происходит перемешивание за счет прямого и обратного потоков при равномерном распределении концентрации вещества в направлении, перпендикулярном движению [130]. При составлении математического описания модели приняты следующие допущения: изменение концентрации вещества является непрерывной функцией координаты (высота вертикальной части сушильной установки); концентрация вещества в каждом сечении, объемная скорость потока и коэффициент продольного перемешивания постоянны.

Процесс описывается следующими дифференциальными уравнениями:

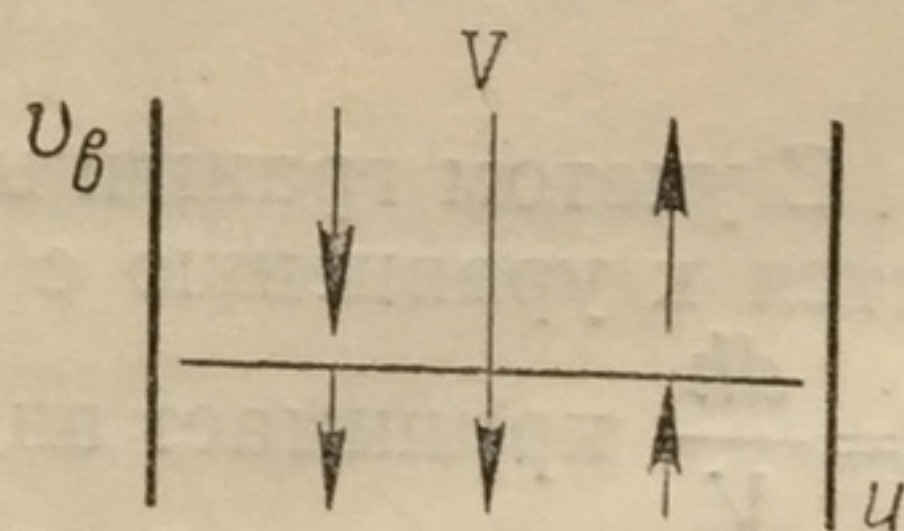


Рис. 72. Структура потока модели

$$c_{\Gamma} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial t} = D_{\Gamma} \frac{\partial^2 T}{\partial h^2} - V c_{\Gamma} \frac{\partial T_{\Gamma}}{\partial h}, \quad (58)$$

$$-\frac{dW}{dt} = \alpha (T_{\Gamma} - T_m), \quad (59)$$

где $V = v_{\text{вит}} - u$; $v_{\text{вит}} = \sqrt{\frac{Ly_{\text{в}} \rho_{\text{м}} g}{\nu \rho_{\Gamma}}}$; V — средняя линейная скорость потока; $v_{\text{вит}}$ — скорость витания; u — линейная скорость потока; g — ускорение силы тяжести; $\rho_{\text{м}}$, ρ_{Γ} — соответственно плотность материала и газа; ν — кинематическая вязкость; c_{Γ} — теплоемкость газа; t — время; T — температура; h — высота вертикальной части сушилки; D_{Γ} — коэффициент продольного переноса тепла; W — влагосодержание материала; α — коэффициент теплообмена; λ — коэффициент теплопроводности; d — диаметр частиц; Lu — критерий Лященко; Re — критерий Рейнольдса; Ar — критерий Архимеда; k — коэффициент съема влаги;

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} 0,2 \left(\frac{ud}{\nu} \right)^{0,82};$$

$$Lu_{\text{в}} = \frac{Re_{\text{вит}}^3}{Ar}; \quad Re = \frac{Ar}{18 + 0,61 \sqrt{Ar}}; \quad Ar = \frac{d^3 \rho_{\text{м}} g}{\nu^2 \rho_{\Gamma}}.$$

Коэффициент продольного переноса тепла определяется из соотношения

$$D_{\Gamma} = \frac{Vh}{\ln k}. \quad (60)$$

Граничные условия в данном случае имеют вид

$$T_{\Gamma}|_{h=0,1\Delta h} = T_0, \quad (61)$$

$$\left. \frac{dT_{\Gamma}}{dh} \right|_{h=0,1\Delta h} = \frac{4c_{\text{м}} G [T_{\text{к}} - T_{\text{м}} (1 - W_0)] + Q_{\text{исп}}}{\pi d^2 c_{\Gamma} \rho_{\Gamma} V (1 - kW)}, \quad (62)$$

$$W|_{h=0,1\Delta h} = kW_0. \quad (63)$$

С учетом граничных условий (61) уравнение (58) сводится к уравнению с одним переменным и при условии

$$dt = \frac{dh}{V} \text{ принимает вид}$$

(58)

$$\frac{d^2 T}{dh^2} - \frac{V(1+c_r)}{D_r} \cdot \frac{dT}{dh} = 0 \quad (64)$$

(59)

или

$$\frac{dF}{dh} - \frac{V(1+c_r)}{D_r} F = 0,$$

где $\frac{dT}{dh} = F$, а с учетом (60)

$$\frac{dF}{dh} - \frac{(1+c_r) \ln k}{h} F = 0.$$

Таким образом, получим обыкновенное дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными

$$F = c_1 h^{(1+c_r) \ln k}. \quad (65)$$

Переходя к T_r , заменяя

$$(1+c_r) \ln k + 1 = A,$$

получаем

$$T_r = c_1 \frac{h^A}{A} + c_2. \quad (66)$$

Используя граничные условия (61), (62), находим

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{c_m G (T_k - T_m)(1 - W_0)}{c_r V \rho_r (1 - kW_0) 0,1 \Delta h^{A-1}}, \\ c_2 &= T_0 - c_1 \frac{0,1 \Delta h^{A-1}}{A}. \end{aligned} \right\} \quad (67)$$

Значение (66) с коэффициентами c_1 и c_2 подставляем в (59) и после решения определяем

$$W = \frac{\alpha}{V} \left[c_1 \frac{h^{A+1}}{A(A+1)} + c_2 h + c_3 - T_m h \right]. \quad (68)$$

Для вычисления c_3 используем граничные условия (63):

$$c_3 = \frac{V}{\alpha} \left[kW_0 + c_1 \frac{0,1 \Delta h^{A+1}}{A^2 + 1} + c_2 0,1 \Delta h - T_m 0,1 \Delta h \right].$$

Далее, задаваясь шагом $\Delta h = 0,01$ м, получаем коэффициенты c_1 , c_2 , c_3 , значения которых на каждом шаге под-

ставляем в (68) для определения распределения W по высоте вертикальной колонны. При составлении математической модели процесса было принято, что удаление влаги в вертикальной колонне происходит в первый период (см. рис. 51, 53). Это было подтверждено многочисленными экспериментами на пилотных и промышленных установках. Однако следует заметить, что высота вертикальной части сушильной камеры в исследуемых установках не превышала 2 м. Учитывая, что при больших высотах линейный закон удаления влаги может нарушаться и изменяться скорость падения материала, принятую модель можно использовать при разделении высоты на зоны, где этот закон соблюдается.

Для решения задач, связанных с определением высоты колонны, обеспечивающей съем влаги $(1 - k) \cdot 100\%$ при заданных значениях параметров ($V, c_m, c_g, W_0, T_g, \rho_g, \rho_m, T_m$), была составлена программа, блок-схема решения которой представлена на рис. 73. Реализация алгоритмов была выполнена на машине «Минск-32» на языке загрузки.

Для практической реализации этой схемы необходимо иметь значения следующих величин: $f_{уд}$ — удельная

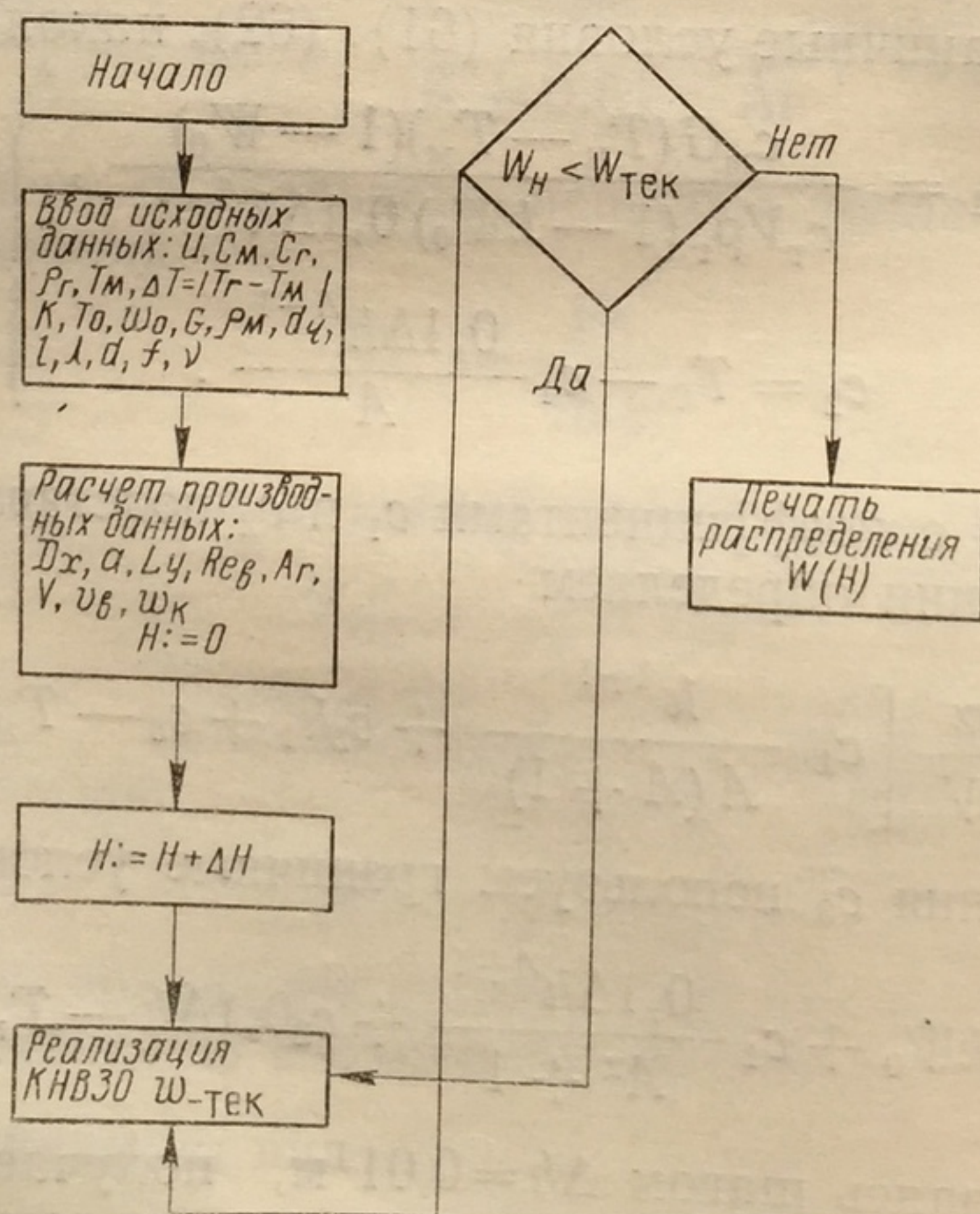


Рис. 73. Блок-схема программы CHARL

поверхность материала, участвующего в теплообмене, в данном случае $f_{уд} = 4G/d\rho$, G — производительность аппарата; u_v — скорость потока, определяемая расчетным путем; α — коэффициент теплообмена, $\alpha = \frac{\lambda}{l} 0,2 \left(\frac{ul}{\nu} \right)^{0,82}$; l — характерный размер; t_v — температура воздуха; W_1 — начальное влагосодержание; d_k — диаметр вертикальной части сушилки; t_m — температура мокрого термометра; v_n, v_k — температура материала в кипящем слое (начальная, конечная).

Порядок расчета аппарата производится следующим образом. Уточняются исходные данные. Начальная температура входящего воздуха принимается, как правило, на 5—10 °С ниже температуры плавления материала. Температура материала в кипящем слое в соответствии с допустимым нагревом материала равна температуре воздуха, выходящего из кипящего слоя. Затем следует рассчитать сушильную камеру кипящего слоя с учетом удаления 10—20% влаги в вертикальной части по известной схеме [5, 93]. Определяются количество влажного материала

$$G_1 = G_2 \frac{100 - W_2}{100 - W_1}; \quad (69)$$

количество испаряемой влаги

$$M = G_1 - G_2; \quad (70)$$

расход тепла

$$Q = 1,15 \{ [M(r + c_n t_{v_2} - c_v t_v) + G_2 c_m (v_k - v_n)] \}; \quad (71)$$

расход сушильного агента

$$L = \frac{Q}{c_v (t_{v_1} - t_{v_2})}; \quad (72)$$

критическая скорость газов

$$W_{кр} = \sqrt{L y_{кр} \nu g \rho_m / \rho_v}$$

и скорость газов на полное сечение решетки

$$W_p = W_{кр} \frac{273 + t_{v_1}}{273 + t_{v_2}},$$

а затем размер решетки и диаметр

$$S = L/3600W_p, \quad d = \sqrt{S/\pi}. \quad (73)$$

Таким образом, все величины для расчета высоты вертикальной части комбинированной сушилки известны. Инструкция по перфорации программы CHARL приведена в приложении 2.

Такая постановка задачи наиболее удобна при расчете аппаратов, которые вновь проектируются. Если сушилка уже имеется и необходимо определить ее пригодность для сушки исследуемых материалов, то задача должна решаться в другой постановке, она отличается тем, что известна высота вертикальной части сушилки. В этом случае математическая модель остается той же, дифференциальные уравнения (58), (59) с граничными условиями: $W|_{t=0} = W_n$, $T|_{h=0} = T_0$, $\frac{dT}{dh}|_{h=0} = 0$. Учитывая, что частицы имеют не шарообразную форму, вводится

коэффициент формы $\varphi = \sqrt[3]{0,207 \frac{S}{V}}$, где S — поверх-

ность; V — объем. В задачу входит определение количества влаги, удаляемой в вертикальной части сушилки, т. е. коэффициента съема влаги при известных параметрах: V , c_m , c_g , W_0 , T_g , ρ_m , ρ_g , h , f , α , G , t_m , и характера распределения влаги по высоте. Алгоритм этой задачи реализуется программой ARGEN (рис. 74). Адекватность принятой модели была подтверждена экспериментальной проверкой (рис. 75).

Для решения задачи в комплексе необходимо рассмотреть процесс удаления влаги в кипящем слое. Полученное значение влагосодержания является исходным.

Процесс сушки в кипящем слое следует отнести к стохастическим процессам, в которых значения выходных величин находятся в вероятностном соотношении с входными и не определяются однозначно. Для описания таких процессов широко применяются экспериментально-статистические методы. При этом эксперимент становится основным источником информации, а методы теории вероятностей и математической статистики — средством обработки результатов экспериментов. Экспериментально-статистические методы математического моделирова-

ния целесооб
ра эксперим
эксперимент
модели стати
Для состав
тов при пасс
корреляцион
ки параметро
правдоподоб

Ввод исходных
данных: $U, C_g, C_m, P_m, P_g, T_g - T_m = \Delta T, \nu, d$

Присвоение зна
К: = 0,99

Определение D
D: = D(K)

Рис

На основе
программа мно
сионного анали
Исходные дан
они перфориру
счисления (10 с
Количество
число значений
ответственно в яче
ления как целы
делям:

ния целесообразно классифицировать как по способу сбора экспериментальных данных (активный и пассивный эксперимент), так и по виду моделей (математические модели статики и динамики объектов исследования). Для составления математической модели статики объектов при пассивном эксперименте используются методы корреляционного регрессионного анализа, методы оценки параметров модели на основе критерия максимума правдоподобия и минимума среднего риска.

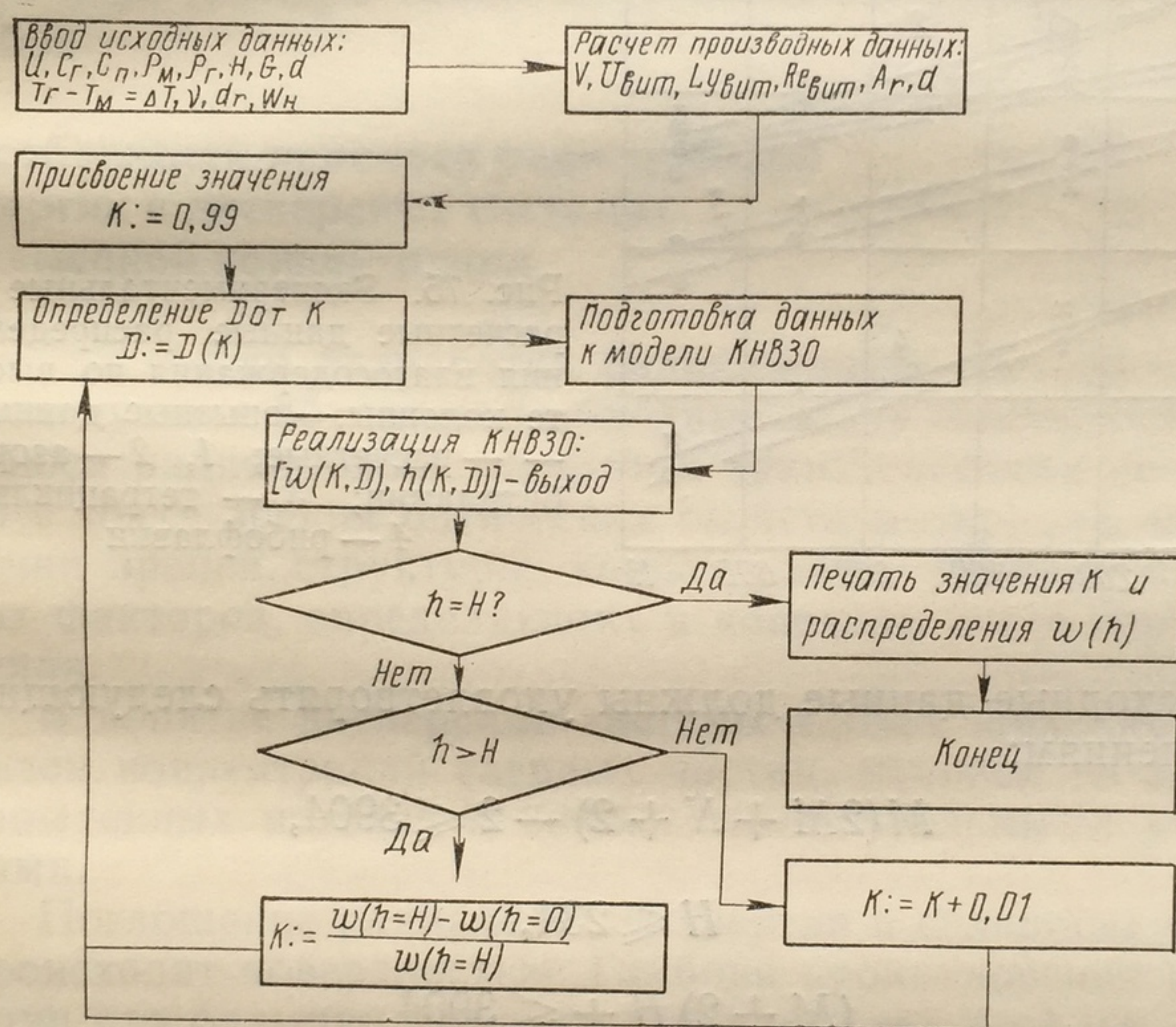


Рис. 74. Блок-схема программы ARGEN

На основе регрессионных моделей была составлена программа многофакторного корреляционного и регрессионного анализа процесса сушки в кипящем слое.

Исходные данные программа АНИПР вводит сама, они перфорируются одной группой в десятичной системе счисления (10 с/с) с кодовой запятой (приложение 2).

Количество рассматриваемых показателей ($M+1$), число значений каждого показателя (H) заносятся соответственно в ячейки 0030, 0031 в десятичной системе счисления как целые числа. Анализ проводился по трем моделям:

линейной

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_m x_m, \quad (74)$$

вида

$$y = a_0 f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_m(x_m), \quad (75)$$

степенной

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m}. \quad (76)$$

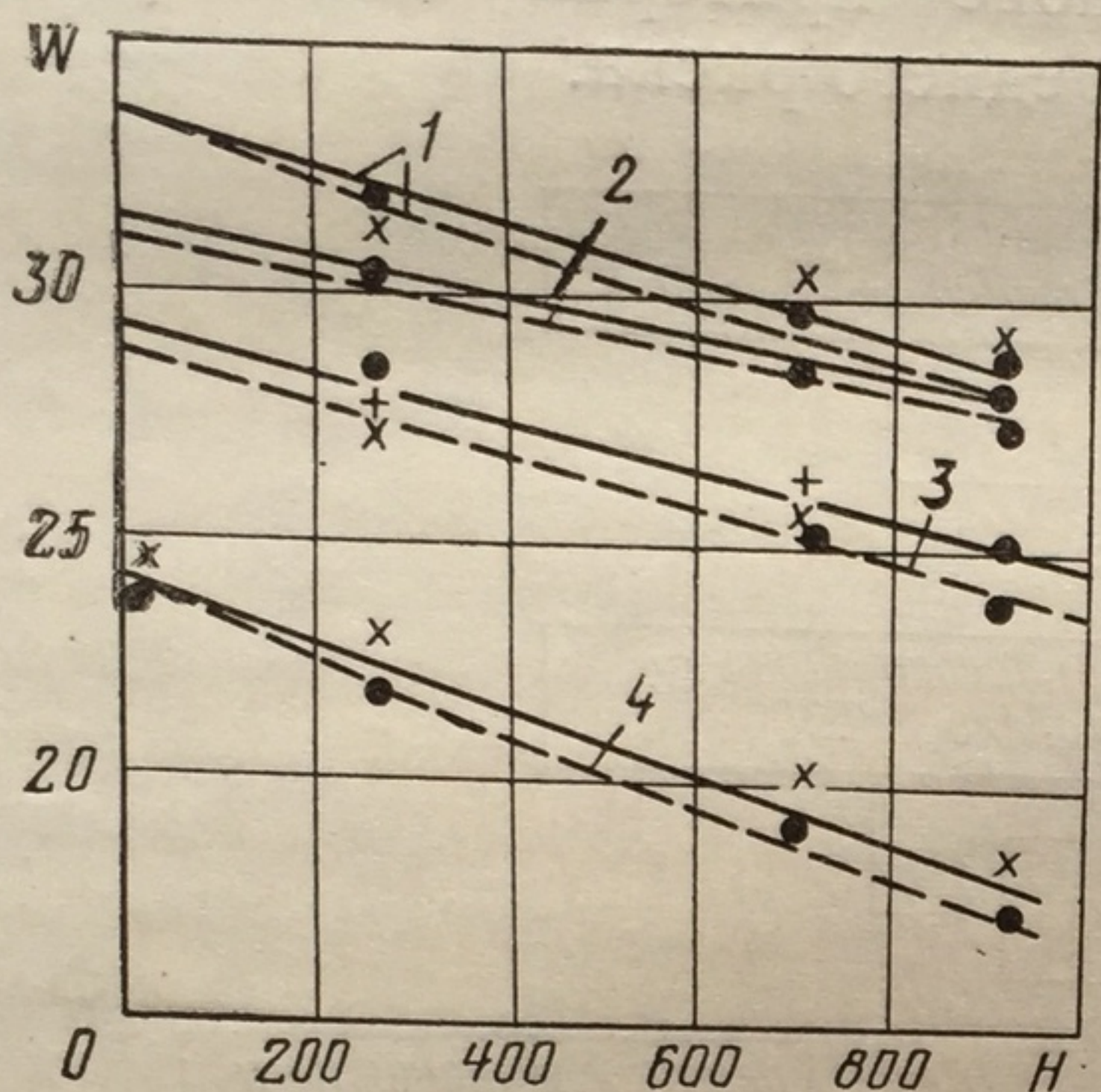


Рис. 75. Экспериментальные и расчетные данные распределения влагосодержания по высоте колонны: — опытные данные; — — расчетные; 1, 2 — азоритиламин; 3 — тетрациклин; 4 — рибофлавин

Исходные данные должны удовлетворять следующим уравнениям:

$$M(2M + N + 2) - 2 \leq 3904,$$

$$N \leq 234,$$

$$(M + 2) N \pm \leq 3904,$$

$$y_i > 0, x_i > 0, x_i \neq 1.$$

С помощью данной программы были построены и проанализированы вышеуказанные модели для экспериментальных данных, собранных в сушильно-термической лаборатории при исследовании процесса сушки медицинских препаратов [127, 128].

Конечная цель процесса — получение высококачественного продукта с влагосодержанием, заданным технологией. Влагосодержание есть функция следующих параметров: скорости сушильного агента, его температуры, высоты плотного слоя, исходного влагосодержания, энер-

(74) гии связи влаги с материалом, теплофизических характеристик.

(75) Наиболее полно отражает процесс модель вида (75).
(76) Параметры функции $f_m(x_m)$ рассчитываются по методу, описанному Д. Брандоном [131]. Критерием для выбора функции служит коэффициент средней линейной ошибки аппроксимации. Для данного метода существенными являются степень влияния каждого из них на результативный показатель, а также независимость факторов между собой.

Особенности переноса радиационной энергии в дисперсных системах невысокой концентрации

Для разработки радиационного метода сушки исследуемых объектов необходимо знать особенности переноса радиационной энергии в таких системах не только с точки зрения оптических свойств материала, но и с точки зрения структуры, концентрации, размера и других факторов, определяющих в конечном счете передачу тепла.

В понятие дисперсные системы входит широкий диапазон концентраций твердых частиц, начиная со слабозапыленных потоков и кончая непродуваемыми засыпками.

Поглощение радиационной энергии в сплошных телах происходит поверхностью. Глубина проникновения радиации для большинства встречающихся тел 2—4 мм (если это не проводники) и 1 мкм для проводников. Дальнейшее распространение тепла в толще объекта происходит по закону теплопроводности. Общий результат — воздействие двух видов переноса.

Для частиц, размер которых равен глубине проникновения электромагнитной волны, процесс поглощения происходит как бы объемом частицы со скоростью распространения этой волны. Общий результат переноса тепла — воздействие на частицу радиации, не осложненной другими видами переноса. Это приводит к тому, что интенсивность теплопереноса определяется скоростью распространения электромагнитной волны и зависит от истинной поглощательной способности материала.

Учет зависимости поглощательной способности от

температуры в этом случае особо необходим. Влияние температуры на истинную поглощательную способность материала, которая определяется только молекулярно-структурным строением вещества, различно для разных материалов. Для диэлектриков переход к коротковолновому действию связан с уменьшением поглощательной способности материала.

Для металлов с увеличением температуры электропроводность повышается, а значит, изменяются коэффициент преломления и соответственно оптические константы. С возрастанием длины волны показатель преломления увеличивается, а поглощательная способность α уменьшается: $\alpha = 2/n = 2/\sqrt{\sigma/c\lambda}$.

Эти положения были известны ранее для сплошных твердых тел. Однако для дисперсного материала, размер которого соизмерим с толщиной проникновения электромагнитной волны, необходимо знать значение истинной поглощательной способности материала, т. е. предельную способность материала превращать энергию падающей электромагнитной волны в тепловую, и ее зависимость от температуры. Обычно при расчете радиационной составляющей поглощательная способность исследуемого материала выбирается из таблиц, которые составлены для сплошных тел, так как в сплошном теле накладывается влияние переноса теплопроводностью в сильной степени и зависимость истинной поглощательной способности от длины падающей волны стирается.

Несмотря на то что для дисперсных систем в действительности мы имеем дело с так называемой эффективной поглощательной способностью, которая зависит от многих факторов, влияние истинной поглощательной способности немаловажно.

Для слабозапыленных потоков (с концентрацией до 1 кг/м^3) эффективная поглощательная способность дисперсных материалов (диэлектрики — песок, корунд) при достаточно высоких температурах весьма невелика [84—91]. Так, например, при $1073\text{—}1173 \text{ К}$ для песка $\alpha = 0,06$, для корунда — $0,02$, а при 473 К соответственно — $0,76$, $0,6$.

При дальнейшем повышении температуры поглощательная способность для диэлектриков в среднем уменьшается и песок, например, становится почти прозрачным. Исходя из этого, следует более корректно оценивать ра-

диацион
случая
мерим
перату
ним, н
го мат
673 К:

$$Q_{из} =$$

Здесь $C_{из}$ — р
темпера

При
= 1273
= 0,6,

зывает,
низких

вать во

След
способн
торов. С
изменя
ванной
щенная,
частиц.

чае отде
цией до
эффекти

На р
ношение
ции при
других
оказывае

На д
персной
ванного
134, 136]

Таки
из явлен
зволяет
та тепло

диацию при низких температурах, так как в некоторых случаях величины ее при 473, 1273 К становятся соизмеримыми, а иногда доля радиации при низких температурах оказывается больше, чем при высоких. Оценим, например, количество радиационного тепла, взятого материалом (корундом) от стенки, нагретой до 273 и 673 К:

$$Q_{\text{из}} = C_{\text{из}} \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_m}{100} \right)^4 \right] F; \quad F = 1 \text{ м}^2, \quad C_{\text{из}} = C_0 a.$$

Здесь $Q_{\text{из}}$ — количество тепла, переданное радиацией; $C_{\text{из}}$ — результирующий коэффициент излучения; T_c, T_m — температура стенки и материала; F — поверхность.

При значениях для первого случая $a=0,02$, $T_c=1273$ К, $T_m=293$ К, $Q_{\text{из}}=2500$ ккал; для второго — $a=0,6$, $T_c=683$ К, $T_m=473$ К, $Q_{\text{из}}=4650$ ккал. Это показывает, что при оценке радиации неверно считать ее при низких температурах всегда незначительной и не оценивать вообще.

Следует учитывать, что эффективная поглощательная способность дисперсных систем определяется рядом факторов. Одним из главных является концентрация частиц, изменяющая соотношение поглощенной и трансформированной энергии, под которой понимается энергия, пропущенная, рассеянная и излученная массой дисперсных частиц. Оценка должна быть произведена в каждом случае отдельно. Для слабозапыленных потоков (концентрацией до 1 кг/м³) увеличение ее приводит к возрастанию эффективной поглощательной способности [84, 132].

На размер частиц основное влияние оказывает соотношение d/λ . Ввиду того что механизм переноса радиации при $d/\lambda \gg 1$ остается постоянным при равенстве всех других параметров, особого влияния этот фактор не оказывает [132, 133].

На долю радиации в суммарном теплообмене дисперсной среды влияют оптические свойства диспергированного вещества, определяемые видом материала [91, 134, 136].

Таким образом, положение о том, что перенос энергии из явления поверхностного превращается в объемное, позволяет рассматривать его в отдельных частицах без учета теплопроводности. Истинная поглощательная способ-

ность материала (частицы) может быть определена экспериментально или методом нагревания с постоянной скоростью с учетом конкретной конфигурации системы, или с помощью оптических приборов UR-10, ИКС-21, UR-20 [136, 137].

Особо следует учитывать, что дисперсные системы — это светорассеивающие объекты, имеющие свои особенности. Наличие рассеяния приводит к тому, что спектры и угловое распределение теплового излучения рассеивающих сред отличаются как от излучения абсолютно черного тела, так и от излучения вещества в сплошном состоянии, и зависят от различных факторов: коэффициентов поглощения материала, упаковки системы, размера частиц, индикатрисы рассеяния, показателей преломления диспергированного вещества и т. д. [134]. Например, известно, что пластинка кварца характеризуется минимальной испускательной способностью в области 9 мкм, а дисперсный порошок этого кварца имеет в этой области спектра максимальное испускание [134, 135].

Рассеяние, происходящее в дисперсной системе, зависит как от свойств отдельных частиц, так и от особенностей всей системы в целом.

Необходимо обратить внимание на соизмеримость размеров частиц и длины волны. Для частиц, размеры которых намного меньше длины волны, коэффициент ослабления и индикатрису рассеяния можно получить по формулам волновой теории света. Если размер частиц становится сравнимым с длиной волны, то вычисление коэффициентов ослабления в этих случаях затруднено, особенно для теоретического исследования диэлектрических, прозрачных частиц, так как в общем балансе рассеиваемой ими энергии, помимо отраженных лучей, значительную роль играют многократно прошедшие через частицу [132, 135].

Но рассеянная энергия включает в себя не только ту часть волны, которая падает непосредственно на частицу и вызывает появление отраженной и преломленной волн, но и возмущения вне контуров частицы, появляющиеся в виде дифрагированной волны. Это явление возникает всегда, когда $d/\lambda \gg 1$, даже в том случае, если поглощательная способность вещества предельна, т. е. равна 1. Математическое объяснение этого явления приведено в работах [132, 135].

Решение задачи рассеяния крупными частицами требует учета дифракционной составляющей и рассмотрения явлений интерференции между отдельными составляющими рассеянного света. Задача еще более осложняется, если наблюдается множество таких частиц, т. е. возникает неоднократное рассеяние. В этом случае нельзя использовать теории Релея, Ми, Ганса, так как рассеивающие объекты недостаточно удалены друг от друга и нужно принимать во внимание интерференцию излучения, рассеянного разными частицами. В дисперсных системах рассеивающие неоднородности находятся на расстояниях, соизмеримых с d/λ , поэтому необходимо учитывать интерференцию излучения, исходящего от соседних неоднородностей, т. е. рассеяние с кооперативными эффектами [133].

Однако основой механизма переноса в данном случае (в падающем слабоконцентрированном потоке) является величина поглотительной способности, определяемая в первую очередь природой материала.

Известно, что существуют приближенные методы решения уравнения переноса излучения в так называемых мутных средах (тензорные и дифференциально-разностные), которые имеют разную степень точности и могут быть использованы при решении задач, рассматривающих перенос энергии в заданных толщинах различных материалов, когда существуют поглощение, рассеяние и излучение в объеме выделенной толщины.

В этом случае коэффициент L эффективного ослабления численно равен обратной величине глубины слоя, при прохождении которой суммарный поток излучения уменьшается в e раз.

В работах [137, 138] описаны теоретически полученные выражения, характеризующие распределение монохроматических потоков излучения внутри капиллярно-пористых коллоидных материалов, а также гипотеза о независимости спектральных коэффициентов поглощения и рассеяния «назад» от координаты x , которые экспериментально подтверждаются благодаря установлению связи между оптическими и терморadiационными характеристиками материалов. Это имеет важное значение при радиационном облучении отдельных частиц в замкнутом пространстве. В этом случае поглотительную способность можно рассматривать как свойства природы

материала без влияния структуры, изменяющейся от толщины (длины) тела, подвергающегося облучению.

Из экспериментальных работ по определению пропускательной способности слоя различных материалов было выявлено отклонение от основного закона Бугера — Ламберта — Бера, главной причиной которого для светорассеивающих сред является многократное рассеяние в слое. Ослабление параллельного пучка излучения плотным слоем светорассеивающей среды происходит по более сложному закону, который характеризуется не только обычным коэффициентом экстинкции, но и эффективным коэффициентом ослабления a , отражающим многократное рассеяние излучения. Данные о проницаемости различных материалов (хлеба, сухарей и т. д.), полученные Э. И. Гуйго, А. С. Гинзбургом, О. И. Росляковой и др., свидетельствуют о проникновении ИК-излучения внутрь пищевых продуктов и материалов. Однако внутренний перенос тепла при ИК-облучении и механизм воздействия его на молекулярную структуру тела до настоящего времени изучены еще недостаточно.

В. Юбиц под глубиной проникновения лучей понимает толщину слоя, в котором энергия излучения падает до 10% от ее первоначального значения, и указывает, что для каждого материала при определенной температуре перенос тепла излучением значительно опережает другие виды теплопередачи [139]. Большинство материалов пропускает только небольшую часть энергии излучения, однако нагреваться могут интенсивно. Большой интерес представляет анализ температурного поля влажного материала при ИК-облучении. Температурное поле облучаемого материала характеризует интенсивность прогрева слоев материала.

В свою очередь температурное поле есть функция структуры материала (характера и размера пор, закона их пространственного распределения). Важное значение имеет влагосодержание, которое, очевидно, влияет не только в количественном отношении, но и на характер связи влаги с материалом. При объемном поглощении возможно использование проникающего облучения. Это приводит к передаче единице объема материала (гранулы, частицы) большего количества энергии, т. е. к интенсификации процесса без опасности перегрева поверхности материала.

Для по
картине те
чении вла
кинетикон
процессе о
В рабо
ИК-выпеч
ное количе
влаги. Поз
внутренне
с переносо

$\frac{dt}{dt}$

Здесь пер
тепла за с
на фазовое
перенос те
материалов
мать во вни
этому в ур
расчет кото
проницаемо
тела [139].
эксперимен
поверхности
ляющий геос
 $q_v \rightarrow q_0$, то я
однако, пре
тическое зн
и определе
поглощаетс
Перенос те
обходимо у
процесс суш
темperatur.
Для случ
ИК-радиаци
дельной час
сталлическо
лекарственно
аскорбинова

Для получения наиболее полного представления о картине тепло- и массообмена при инфракрасном облучении влажных материалов необходимо проследить за кинетикой влагоотдачи и изменением поля влажности в процессе облучения.

В работе А. С. Гинзбурга [138] отмечено, что при ИК-выпечке некоторых пищевых продуктов определенное количество тепла переносит внутрь материала поток влаги. Поэтому общее дифференциальное уравнение внутреннего теплообмена с источником тепла, связанного с переносом тепла потоком жидкости, имеет вид

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a \nabla^2 t + \frac{r}{c_{\Pi}} \varepsilon \frac{d\omega}{d\tau} - \frac{c_{\text{ж}} \rho_{\text{ж}}}{c_{\Pi} \rho_0} v_{\text{ж}} \nabla t. \quad (77)$$

Здесь первый член учитывает кондукцию, т. е. перенос тепла за счет теплопроводности, второй — затрату тепла на фазовое превращение (испарение влаги), третий — перенос тепла потоком жидкости. При проницаемости материалов для радиационной энергии следует принимать во внимание тепло, вносимое лучистым потоком, поэтому в уравнение (77) необходимо добавить член q_v , расчет которого требует особых исследований, так как проницаемость — функция структуры, формы и размера тела [139]. Так, для неограниченной пластины на основе экспериментов $q_v = q_0 e^{-S(R-x)}$, где x — расстояние между поверхностным и рассматриваемым слоями; R — определяющий геометрический размер. Если x стремится к R , $q_v \rightarrow q_0$, то явления происходят на поверхности. Следует, однако, предположить, что существует определенное критическое значение x , когда при двухстороннем облучении и определенном значении S $q_0 \rightarrow 0$, т. е. лучистая энергия поглощается полностью и не трансформируется внутрь. Перенос тепла потоком жидкости — явление, которое необходимо установить экспериментально, оно замедляет процесс сушки и приводит к значительным градиентам температур.

Для случая обработки материала с использованием ИК-радиации нужно установить механизм переноса в отдельной частице. Полагая, что в отдельных частицах кристаллической структуры, которую имеет большинство лекарственных и витаминных препаратов (медицинская аскорбиновая кислота, барбитуровая кислота, тетрацик-

лин, сорбоза и т. д.), не происходит рассеяния, а размер частиц соответствует случаю, когда $x \rightarrow R$, можно предложить методику расчета реактора для термической обработки ИК-излучением.

Процесс передачи ИК-излучения от излучателей (стенки) к приемнику падающим дисперсным частицам можно представить следующим образом. До поступления материала в трубу источником излучения являются нагретые стенки трубы, которые излучают тепло по полусфере от $-\pi/2$ до $+\pi/2$. Теплопроводностью стенки пренебрегаем. Энергия, отдаваемая поверхностью трубы путем излучения, равна $a_0 \sigma_0 T_0^4(x) dx$. Отдача энергии падающему материалу компенсируется поступлением постоянного теплового потока $q dF$. Как только частицы поступают в трубу, лучистый поток, пронизывая их, ослабляется.

Через мгновение каждая частица становится излучающим центром и начинается обмен энергией между частицами, частицами и стенкой. Так как температура материала изменяется по высоте трубы, то происходит собственное переизлучение между частицами по высоте аппарата. Благодаря замкнутости системы частицы получают энергию от всей поверхности теплообменника. Следует также указать, что рассеяние на больших частицах играет в данной системе роль как бы дополнительного источника излучения [91]. Однако рассеяние в системе, собственное излучение, количество отраженной и пропущенной энергии нами не учитывались. Действительно, нагрев дисперсного материала происходит только за счет поглощенной этим материалом энергии. Интенсивность прогрева зависит от количества поглощенной энергии. Процесс в данном случае определяется не только температурой излучателя, оптическими и физико-химическими свойствами материалов, но и характером движения материала в каналах, числом соударений частиц друг с другом и со стенками аппарата.

Учитывая, что метод предусматривает распределенную подачу через матрицу, имеющую большую степень перфорации и диаметр, равный диаметру трубы реактора, соударения частиц друг с другом и со стенками канала будут минимальными [83].

Однако сложность переизлучений в данном случае будет велика и найти аналитическое выражение баланса

энергии
ции μ , ди
ратуры и
тально.

Испо
ную мето
сти в дан
В работа
способнос
мощью ра
позволяла
за счет по
глощатель
щательной
способность
тодика о
учитывает
зываемых
ченном пр
ности каж

Нами б
называемо
которая уч
материала
[83—85].

где $a_{эф}$ —
М — коэфф
 μ — концен
 $n = \pm (0-1$
риков). Од
пература ст

Анализ
ния различ
териями, о
родинамика
риала.

Схема р
теплообмен
материал п
стенок кана

энергии пока невозможно. Поэтому влияние концентрации μ , диаметра реактора d , частиц $d_{\text{ч}}$, высоты h и температуры излучателя необходимо определять экспериментально.

Использовать ранее разработанную экспериментальную методику для получения поглотительной способности в данных условиях, на наш взгляд, нецелесообразно. В работах [132, 140] излучательная и поглотительная способность запыленных потоков определялась с помощью радиометров того или иного типа. Эта методика позволяла найти суммарное ослабление интенсивности за счет поглощения и рассеяния. Определенная затем поглотительная способность по Бугеру не является поглотительной способностью, которая характеризует способность материала поглощать энергию. Кроме того, методика определения поглотительной способности не учитывает многократности поглощения и рассеяния, вызываемых движением дисперсного материала в ограниченном пространстве, и доли облученности всей поверхности каждой частицы.

Нами была предложена методика определения так называемой эффективной поглотительной способности, которая учитывала влияние температуры стенки, вида материала, концентрации, диаметра и длины излучателя [83—85]. В результате была получена формула

$$a_{\text{эф}} = M \frac{\mu^{0.7}}{d_{\text{т}}^{0.3}} T^m h^n, \quad (78)$$

где $a_{\text{эф}}$ — эффективная поглотительная способность; M — коэффициент, зависящий от природы материала; μ — концентрация; d — диаметр аппарата; $m = \pm(1-3)$; $n = \pm(0-1)$ (плюс — для металлов, минус — для диэлектриков). Однако это справедливо для случаев, когда температура стенки не изменяется по высоте.

Анализ многих экспериментов и сопоставление влияния различных факторов показали, что основными критериями, определяющими ход процессов, являются гидродинамика движения, концентрация и природа материала.

Схема радиационного процесса, имеющего место в теплообменниках с падающим слоем, и случай, когда материал прогревается за счет тепла, поступающего от стенок канала, рассмотрены в работе [135]. С верхнего

торца цилиндрической трубы в виде дождя сыплется дисперсный материал известного фракционного состава. Предполагается, что процесс стационарен, зависимость от радиуса не учитывается, содержимое трубы рассматривается как однородная смесь воздуха и материала в каждом сечении x , а смесь характеризуется величинами ρ , μ_{ej} , μ_i , $\Theta(x)$, $v(x)$, газ считается идеальным и почти прозрачным для лучей, при учете теплообмена со стенкой трубы принимается во внимание только лучистый теплообмен.

Система, содержащая уравнения движения, сохранения массы, баланса энергии, имеет следующий вид:

$$\varepsilon \frac{dv}{dx} = \rho q - \frac{dp}{dx}, \quad (79)$$

$$\rho v = \rho_0 v_0 = \varepsilon, \quad (80)$$

$$-\frac{d}{dx} \left(\lambda \frac{d\Theta}{dx} \right) + \varepsilon \frac{d(c\Theta)}{dx} + \varepsilon \frac{1}{2} \frac{dv^2}{dx} = \frac{2\pi R}{S} Q_{изл}, \quad (81)$$

$$p = a\rho\Theta, \quad (82)$$

краевые условия

$$-\lambda \frac{d\Theta}{dx} = S\sigma'(\Theta^4 - T_0^4)|_{x=h}, \quad (83)$$

$$v(0) = v_0.$$

Значения c , a , λ_2 определяются по формулам:

$$c = c_r + c_m = \frac{n}{2} \sum \frac{\mu_i f_i}{M_i} + \mu_i c_i, \quad (84)$$

$$a = \frac{R \sum_2 \mu_i / M_i}{1 - \frac{\rho \mu_i}{\rho_{0r}}}, \quad (85)$$

$$\lambda_2 = V\bar{\Theta} \sum_{i=2} \frac{\mu_i}{\mu_2 a_{i2} + \mu_3 a_{i3} + \mu_4 a_{i4} + \dots}. \quad (86)$$

Для принятой слоистой структуры, используя равенство потоков и температур на границе газ — частица, находим

Устр
Подробный выв
саны в [84, 85]

λ_{стр}

Решение указа
основу которой
линейности ура
мо знать значе
материала, кот
нами ранее, а т
находятся из та

Если считат
краев трубы, т
Пренебрегаем
меньше всех д
рез верхний то
ложений уравн

В результате р
ла Θ при извес
соображений)
прос о габарит
решение метода
дающем слое п

$$\gamma_{\text{стр}} = \frac{T_x - T_1}{l_1} \lambda_1 = \frac{T_2 - T_x}{l_2} \lambda_2, \quad (87)$$

$$T_x = \frac{T_1 \frac{\lambda_1}{l_1} + T_2 \frac{\lambda_2}{l_2}}{\frac{\lambda_1}{l_1} + \frac{\lambda_2}{l_2}}. \quad (88)$$

Подробный вывод и обозначения величин нами были описаны в [84, 85]. Для

$$\lambda_{\text{стр}} = \frac{1}{\frac{\rho}{\rho_{\text{ст}}} \frac{\mu_i}{\lambda_i} + 1 - \frac{\rho/\rho_{\text{ст}} \mu_i}{\lambda_{\Gamma}}}. \quad (89)$$

Решение указанной системы осуществляется на ЭВМ, в основу которой положен счет интераций вследствие нелинейности уравнений. При реализации схемы необходимо знать значения истинной поглотительной способности материала, которые определяются методом, описанным нами ранее, а также коэффициентов ρ , σ_{ij} , c_i , μ_i , которые находятся из таблиц и экспериментально [152].

Если считать, что точка x расположена далеко от краев трубы, то $Q_{\text{изл}}$ можно считать не зависящим от x . Пренебрегаем также кинетической энергией, так как она меньше всех других видов энергии, и потоком тепла через верхний торец трубы. В результате всех этих предположений уравнение примет более простой вид

$$-\lambda \frac{d\Theta}{dx} + \varepsilon c \Theta = \frac{2}{R} Q_{\text{изл}} x + \varepsilon c \Theta. \quad (90)$$

В результате решения определяем температуру материала Θ при известной (либо взятой из конструктивных соображений) высоте колонны. Это позволяет решить вопрос о габаритах установки, а значит, найти инженерное решение метода радиационного нагрева материала в падающем слое при наружном обогреве.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ НОВЫХ МЕТОДОВ СУШКИ И КОНСТРУКЦИЯ СУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

Предложенные методы сушки были всесторонне проверены в лабораторных условиях на пилотных установках, а затем внедрены на различных предприятиях медицинской промышленности.

Как уже отмечалось, разработка новых методов выполнена с учетом основных требований производства и особенностей его. На основании изложенного можно сделать некоторые обобщения:

1) эффективность и перспективность метода определяются возможностью использовать для сушки большинства лекарственных препаратов один типоразмер и осуществлять органическую увязку технологических процессов до и после сушки и интенсивный тепломассоперенос;

2) рациональный технологический режим сушки для ряда препаратов может быть осуществлен при организации процесса, который обеспечивает гибкую регулировку сушки и гранулирования; сочетание процессов перемешивания, грануляции и сушки; минимальные потери материала на всех стадиях и ликвидацию ручного труда.

Характерными особенностями новых методов сушки являются сочетание технологических процессов (гранулирование и сушка, сушка и предварительная очистка газов); комбинированный подвод тепла (конвективно-кондуктивный и конвективно-радиационный), обеспечивающий быстрый нагрев термолабильного материала; комбинированная гидродинамика, позволяющая провести процессы тепло- и массообмена при мягких режимах; способ подачи, обеспечивающий псевдоожижение

даже труд
цесс и его
Предло
прерывног
сталлокол
Харак
приведены

Рис. 76. Схе
образца суш
действия сис
БССР, испыт
ковском зав
дящимся»: 1
нулятор; 3 —
тилятор; 5

Первый
де «Здоров
рине в 1969
ставлена на
2, сушильн
диаметром
частью, кал
1 и пульт
шилки 1500
жил воздух
ром и нагре
Отработанны
лон марки I
высушиваем
Промышл
сульфазоле
На Уман

Габариты, м
Диаметр кал
Высота слоя

даже трудноожижаемых материалов; непрерывный процесс и его температурный автоматический контроль.

Предложенные методы реализованы в аппаратах непрерывного действия для сушки кристаллических, кристаллоколлоидных и пастообразных материалов.

Характеристики некоторых внедренных установок приведены в табл. 1 приложения 1.

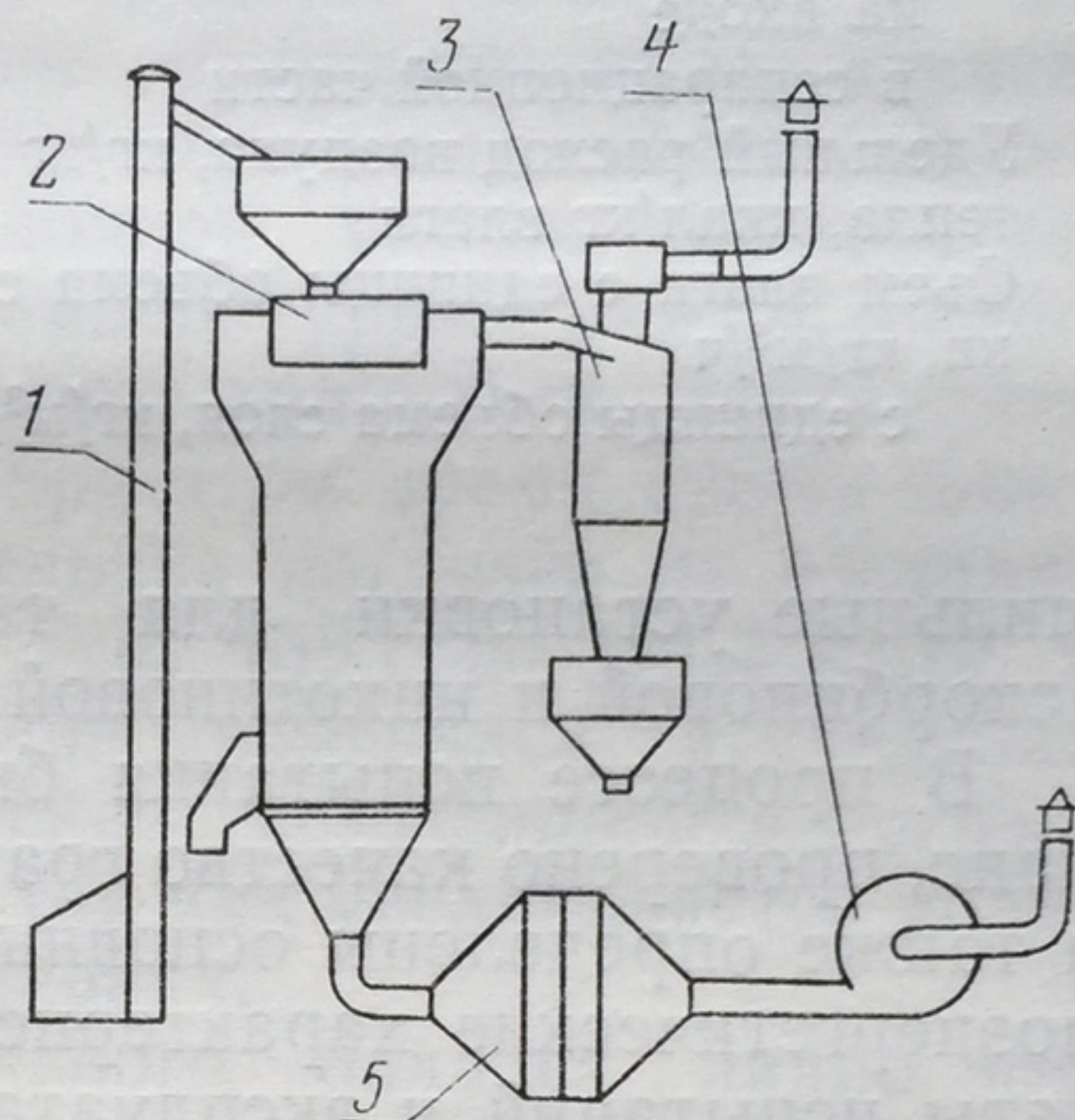


Рис. 76. Схема промышленного образца сушилки непрерывного действия системы ИТМО АН БССР, испытанного на Харьковском заводе «Здоровье трудящимся»: 1 — нория; 2 — гранулятор; 3 — циклон; 4 — вентилятор; 5 — калориферы

Первый образец был испытан на Харьковском заводе «Здоровье трудящимся» на норсульфазоле и амидопирине в 1969 г. [143]. Схема сушильного аппарата представлена на рис. 76. Установка состояла из гранулятора 2, сушильной камеры, включающей вертикальную трубу диаметром 400 мм с расширяющейся сепарационной частью, калорифера 5, вентилятора 4, циклона 3, нории 1 и пульта управления. Высота вертикальной части сушилки 1500 мм. Сушильным и ожижающим агентом служил воздух, который нагнетался в установку вентилятором и нагревался в двухсекционном электрокалорифере. Отработанный воздух удалялся из установки через циклон марки ЦН-15, где задерживались легкие фракции высушиваемого препарата.

Промышленные испытания были проведены на норсульфазоле с начальным влагосодержанием 25—29%.

На Уманском витаминном заводе были испытаны су-

Техническая характеристика установки

Габариты, мм	4000 × 810 × 2800
Диаметр камеры, мм	400
Высота слоя, мм	200

Гидравлическое сопротивление, мм
рт. ст.

90

Производительность по сухому веществу, кг/ч

50

Сушильный агент

воздух

Температура воздуха, °С:

на входе

140

на выходе

50—55

Скорость воздуха, м/с:

на входе

1,4—2

в сепарационной части

0,3—0,5

Удельный расход воздуха, кг/кг влаги,
тепла, ккал/кг влаги

3

803,5

Съем влаги с единицы объема сушил-
ки, кг/м³/ч

63

с единицы объема слоя, кг/м³/ч

475

шильные установки для таблетуемых медицинской аскорбиновой и никотиновой кислот (рис. 77) [112].

В процессе испытания был снят материальный баланс, проверено качество гранулята и готовой продукции, а также определены основные гидродинамические и теплоэнергетические характеристики. Как показали результаты испытаний и эксплуатации, установка быстро пе-

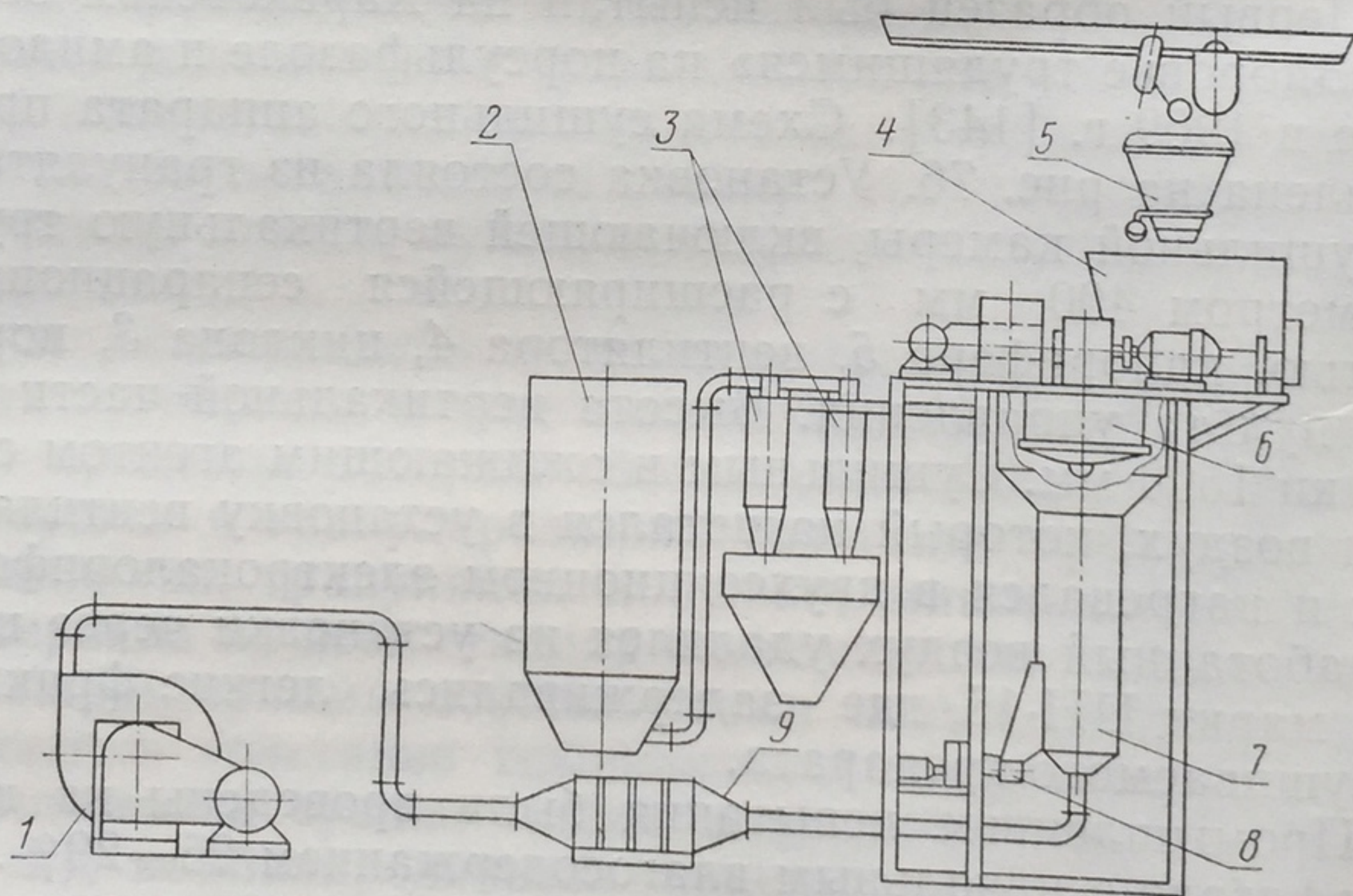


Рис. 77. Схема установки для сушки медицинской аскорбиновой кислоты, установленной на Уманском витаминном заводе: 1 — вентилятор; 2 — фильтр; 3 — батарея циклонов; 4 — загрузочный бункер; 5 — бункер с откидывающимся днищем; 6 — гранулятор; 7 — сушильная камера; 8 — турникет для выгрузки сухого материала, 9 — калориферная установка

переходит на рабочий режим (через 4—5 мин после включения). Производительность ее колеблется от 95 до 110 кг/ч и может быть доведена до 150 кг/ч. Температурный режим более жесткий по сравнению с полочными сушилками и поддерживается в заданных пределах: температура входящего воздуха 115—120 °С.

Для правильного ведения процесса и получения качественного продукта важное значение имеет зависимость температуры материала от его влажности. В результате опытно-эксплуатационной работы было установлено, что оптимальный температурный режим в слое, при котором влажность сухого гранулята составляла 0,1—0,3%, равен 50—60 °С, при этом время сушки колебалось от 10 до 15 мин, удельная нагрузка на площадь распределительной решетки — от 138,7 до 191,3 кг/м², а коэффициент псевдооживления изменялся в пределах 1,3—2. Дальнейшее повышение коэффициента псевдооживления нецелесообразно, так как увеличивается количество мелкой фракции в циклонах.

Из результатов материального баланса видно, что циклоны полностью очищали воздух и мелкая фракция материала практически в фильтр не попадала. Потери в процессе сушки составляли 0,1—0,2%. Основное место потерь — смена тары под выгрузочным отверстием секторного затвора [112].

Полученный гранулят удовлетворял производственным требованиям. Результаты испытаний сушилки на Уманском заводе приведены в табл. 7 приложения 1.

Сушилки, которые реализуют комбинированный метод сушки (СМК — сушилка медпрепаратов комбинированная), серийно выпускаются начиная с 1975 г. Пензенским заводом Дезхимоборудования и предназначены для сушки и грануляции как кристаллических, так и кристаллоколлоидных материалов различной влажности [18, 141—143].

Производительность сушилки по сухому материалу зависит от основных свойств высушиваемого материала, температуры его плавления, истинной плотности и размера частиц и определяется его исходным влагосодержанием и термостойкостью. При существующих размерах аппарата производительность установки может достигать до 300 кг/ч и выше.

Принцип действия сушилки состоит в том, что влаж-

Техническая характеристика установки СМК

Производительность, кг/ч	50, 100 и выше
Температура теплоносителя (воздуха), °С	20—250
Влажность продукта, %:	
начальная	1—50
конечная	0,1—0,066 и ниже, необходимая по технологии
Напор вентилятора, мм вод. ст.	700
Установленная мощность, кВт	25—50
Давление пара для нагрева воздуха в паровом калорифере, атм	2—6
Габаритные размеры, мм:	
длина	5340
ширина	3400
высота	5290
диаметр цилиндрической части	500
диаметр сепарационной части	700
Удельная нагрузка плотного слоя, кг/м ²	
Удельный расход воздуха на 1 кг влаги, кг/кг	138,7
Удельный расход тепла на 1 кг влаги, кг/кг	50—80
Потери материала, %	800—1000
Время сушки, мин	0,2—0,3
К.п.д. установки, %	5—15 60—70

ный материал, предназначенный для сушки, подается с помощью электротали и тележки с опрокидывающим днищем в загрузочный бункер (рис. 78). Загрузка в бункер сушилki может производиться самотеком, пневмоподачей и т. д. Из бункера материал шнеком 4 подается в гранулятор 5, где образуются гранулы за счет выдавливания массы лопастью шнека 6 через перфорированную решетку 3. Затем ножи, скользящие по наружной поверхности решетки, срезают гранулы, и они падают в сушильную камеру, имеющую расширенную конусную 2 и вытянутую цилиндрическую 10 части. Навстречу гранулам движется нагретый воздух, который их подсушивает. Гранулы собираются на удерживающей решетке 12, где воздушным потоком «ожижаются», окончательно высушиваются в кипящем слое и непрерывно выгружаются через секторный питатель 1. Для получения стабильного ожижения и возможности высушивания слипающихся материалов в кипящий слой введена мешалка 11. Сушильным и ожижающим агентом служит воздух, который нагнетается в установку вентилятором 13 через распре-

Рис. 78. Схема сепарации: 1 — выгрузочного пространства; 2 — бункер; 3 — грануляционная часть сепаратора; 4 — вертикальная мешалка; 5 — удерживающая решетка; 6 — удерживающая решетка; 7 — удерживающая решетка; 8 — удерживающая решетка; 9 — удерживающая решетка; 10 — удерживающая решетка; 11 — удерживающая решетка; 12 — удерживающая решетка; 13 — удерживающая решетка.

делительно-удерживающую решетку. Засасываемый снаружи или из рабочего помещения воздух через фильтр подается сначала в калорифер 14 для подогрева, а затем последовательно проходит снизу вверх лежащий на удерживающей решетке материал, падающий поток материала, циклон 8, фильтр 9 и удаляется в атмосферу.

Установка может работать как в непрерывном, так и в полунепрерывном режиме. При непрерывном режиме необходимо соблюдать непрерывную подачу влажного материала из бункера загрузки в гранулятор; бесперебойную подачу материала из гранулятора в кипящий слой; постоянную высоту кипящего слоя; постоянное число оборотов разгрузочного устройства, определяющее

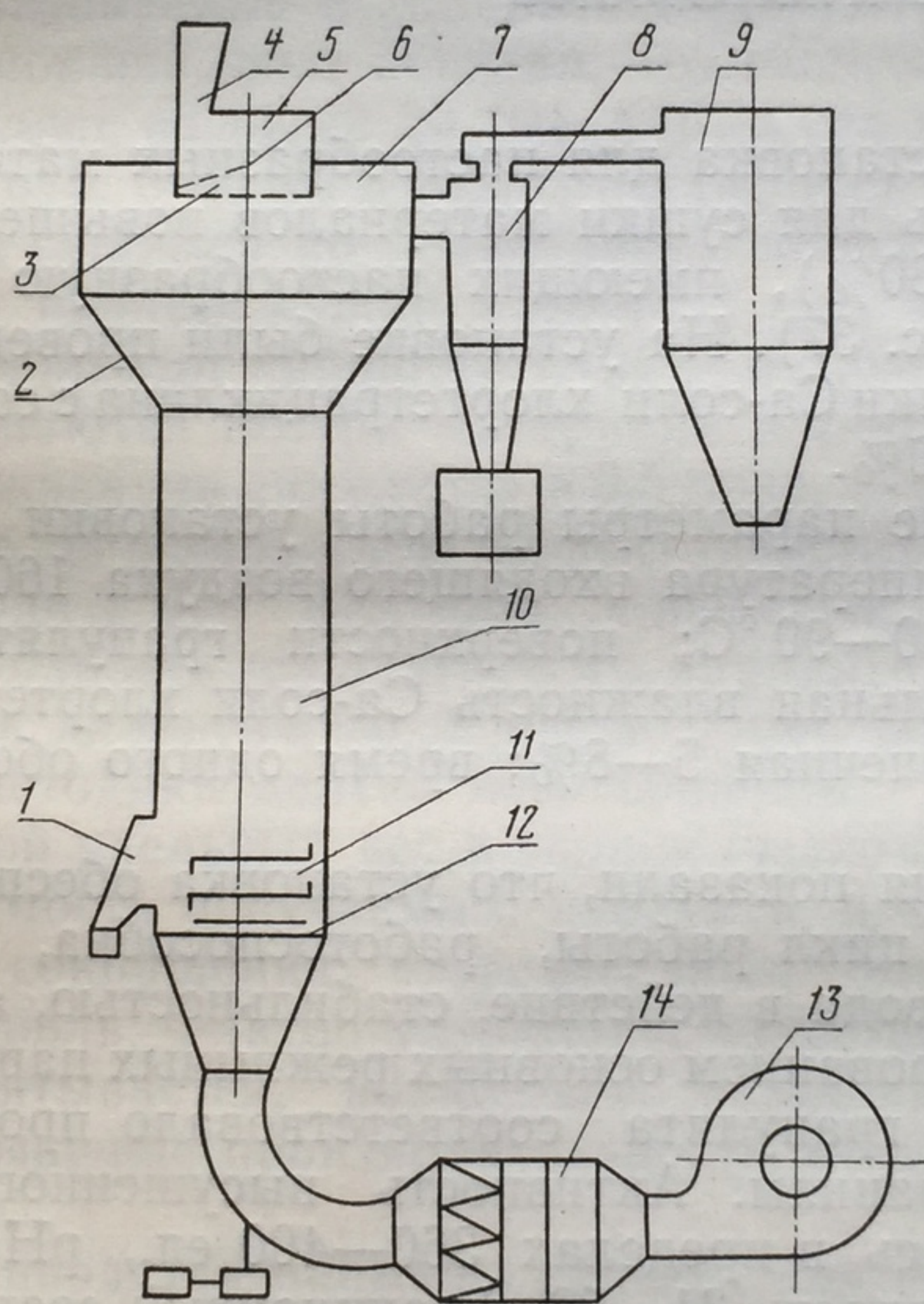


Рис. 78. Схема серийного образца сушилки СМК непрерывного действия: 1 — выгрузочное устройство; 2 — суженная часть сепарационного пространства сушильной камеры; 3 — решетка гранулятора; 4 — бункер; 5 — гранулятор; 6 — продавливающее устройство; 7 — расширенная часть сепарационного пространства; 8 — циклон; 9 — фильтр; 10 — вертикальная часть сушильной камеры; 11 — двухъярусная мешалка; 12 — удерживающая решетка; 13 — вентилятор; 14 — калориферная установка

высоту кипящего слоя; постоянство подачи в сушилку воздуха без изменения температуры на входе и температуры отходящего воздуха.

При полунепрерывном режиме, т. е. когда осуществляется непрерывная загрузка влажного материала и периодическая выгрузка для нормальной работы, следует поддерживать непрерывную подачу сырого материала из бункера загрузки в гранулятор и материала из гранулятора в кипящий слой, а также периодически включать выгрузочное устройство.

4.1. ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОЕ ОСВОЕНИЕ НОВОГО МЕТОДА СУШКИ ПАСТООБРАЗНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Установка для пастообразных материалов использовалась для сушки материалов повышенной влажности (60—80%), имеющих пастообразную консистенцию (см. рис. 37). На установке были проведены исследования сушки Са-соли хлортетрациклина с содержанием влаги 75—80%.

Режимные параметры работы установки были следующие: температура входящего воздуха 160 °С; в слое материала 80—90 °С; поверхности гранулятора 280—300 °С; начальная влажность Са-соли хлортетрациклина 75—80%; конечная 5—8%; время одного оборота барабана 4 мин.

Испытания показали, что установка обеспечивает непрерывный цикл работы, работоспособна, отличается быстротой ввода в действие, стабильностью, автоматическим регулированием основных режимных параметров.

Качество гранулята соответствовало производственным требованиям. Активность высушенного материала находилась в пределах 360—400 ед., $pH=8,7$, остаточная активность 31—52, фракционный состав $d_{cp}=1—2$ мм.

Использование данной установки для непрерывной сушки и грануляции пастообразных лекарственных препаратов (типа Са-соли хлортетрациклина с начальной влажностью 75—80%) в промышленности позволит интенсифицировать процесс сушки, улучшить качество продукта, санитарные условия, уменьшить потери материала.

ла, сократить производственные площади, т. е. значительно повысить эффективность работы по сравнению с существующими сушилками.

4.2. ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ВНЕДРЕНИЯ СУШИЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ И ПЕРСПЕКТИВА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ИХ В ДРУГИХ ОТРАСЛЯХ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

В результате совместной работы Института тепло- и массообмена им. А. В. Лыкова АН БССР с рядом предприятий (Белгородский витаминный комбинат, Уманский завод, объединение «Здоровье» и др.) в течение 1970—1975 гг. внедрены новые интенсивные методы сушки, реализованные в аппарате серийного типа СМК. Эксплуатационный опыт показал, что экономический эффект составляет не менее 20 тыс. руб. в год и возрастает до 140 тыс. руб. и более в зависимости от стоимости препарата. Эти сушилки по сравнению с полочными интенсифицируют процесс сушки в десятки раз, а с периодическими сушилками кипящего слоя — в 1,5—2 раза, при этом уменьшаются потери материала в 2—2,5, трудоемкость обслуживания снижается в 3,5 раза.

В расчет экономической эффективности обязательно должны входить все факторы, способные объективно оценить выгодность предлагаемого варианта и его перспективность дальнейшего использования. Однако существующие методики далеко несовершенны. Так, например, основной удельный вес в экономическом расчете занимает стоимость получаемого продукта, и, следовательно, процент сокращения безвозвратных потерь играет решающую роль. Фактор улучшения качества продукции почти не учитывается, возможное наращивание мощности и повышение производительности может совсем не оцениваться.

Ниже приводятся примеры расчета для ампициллина в двух вариантах. В первом случае учитывается производственная программа объединения «Мосмедпрепараты» им. Л. Я. Карпова без возможного расширения производства за счет внедрения нового более производительного оборудования. Второй вариант выполнен из расчета реальной производительности внедряемого оборудования.

Расчет экономической эффективности внедрения су-

шилки СМК для ампициллина-тригидрата на объединении «Мосмедпрепараты» им. Л. Я. Карпова выполнен по перечню технико-экономических показателей, который приведен ниже. *

Технико-экономические показатели	Базовый вариант	Вариант внедрения
Тип установки	Сушилка кипящего слоя	СМК
Вид обрабатываемой продукции	Ампициллин	
Капитальные вложения в установку, руб.	8264	24000
Годовая производительность установки, т	14,6	50 кг/ч
Годовая производственная программа, тыс. кап.	36000	36000
Норма амортизации установки, %	18,2	
Фактический расход пара на единицу обрабатываемой продукции, Г/кал	0,0158	0,00006
Фактический расход электроэнергии на единицу обрабатываемой продукции, кВт·ч/тыс. упаковок	7,36	25 кВт·ч
Стоимость пара, руб/т	3,52	5,35 руб/Гкал
Стоимость 1 кВт·ч электроэнергии по двухставочному тарифу, руб/1000 кВт·ч	14,86	
Численность обслуживающего персонала, чел/смен	3,3	I
Сменность, смен/сут	4	I
Месячная заработная плата обслуживающего персонала, руб.	179—191	
Производственная площадь, занимаемая установкой с учетом проходов, м ²	50	
Стоимость 1 м ² производственной площади, руб/м ²	151	
Процент безвозвратных потерь продукта, %	8,5	0,5
Себестоимость готового продукта, руб/тыс. упаковок	98,31	
Годовой фонд рабочего времени, чел/ч	3820,5	

1. Базовый вариант

1.1. Амортизационные отчисления от стоимости оборудования:

$$A_1 = K_1 \cdot a = 8264 \cdot 0,182 = 1504 \text{ руб.},$$

* Перечень составлен объединением «Мосмедпрепараты» им. Л. Я. Карпова.

где K_1 — капитальные вложения в установку, руб.; a — норма амортизации.

1.2. Стоимость расхода пара:

$$C_{1\text{пар}} = q_1 B_1 C_{\text{пар}} = 0,0158 \cdot 36\,000 \cdot 5,33 = 3032 \text{ руб.},$$

где q_1 — удельный расход пара, Гкал/тыс.капс.; B_1 — производственная программа, т. капс.; C_1 — стоимость 1 Гкал. пара, руб.

1.3. Стоимость расхода электроэнергии:

$$C_{1\text{эл.эн}} = q_{1\text{эл.эн}} B_1 C_{\text{эл.эн}} = 7,36 \cdot 36\,000 \cdot 0,0148 = 3921 \text{ руб.},$$

где $q_{1\text{эл.эн}}$ — удельный расход электроэнергии, кВт·ч/тыс. капс.; $C_{\text{эл.эн}}$ — стоимость 1 кВт·ч, руб.

1.4. Заработная плата обслуживающего персонала:

$$Z_1 = \Phi_1 m n \cdot 12 = 179,91 \cdot 4 \cdot 3,3 \cdot 12 = 28\,497 \text{ руб.},$$

где Φ_1 — фонд заработной платы обслуживающего персонала, руб/мес.; m — сменность; n — численность обслуживающего персонала, чел/смен; 12 — количество месяцев.

1.5. Стоимость безвозвратных потерь продукта:

$$C_{1\text{потерь}} = \rho B_1 C_{\text{пр}} = 0,085 \cdot 36\,000 \cdot 98,31 = 300\,828 \text{ руб.},$$

где ρ — процент безвозвратных потерь продукта; $C_{\text{пр}}$ — стоимость готового продукта, руб/тыс. капс.

1.6. Текущие затраты базового варианта:

$$C_1 = A_1 + C_{1\text{пар}} + C_{1\text{эл.эн}} + Z_1 + C_{1\text{потерь}} = 1504 + 3032 + 3921 + 28\,497 + 300\,828 = 337\,782 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты:

$$П_1 = C_1 + E_n K_1 = 337\,782 + 0,15 \cdot 8264 = 339\,022 \text{ руб.},$$

$$C_1^{\text{уд}} = \frac{337\,782}{36\,000} = 9,3 \text{ руб/тыс. капс.},$$

$$П_1^{\text{уд}} = \frac{339\,022}{36\,000} = 9,41 \text{ руб/тыс. капс.},$$

где E_n — нормативный коэффициент эффективности.

2. Вариант внедрения (на программу 36 000 т. капс.)

2.1. Амортизационные отчисления:

$$A_2 = K_2 a = 24\,000 \cdot 0,182 = 4368 \text{ руб.}$$

2.2. Стоимость расхода пара:

$$C_{2\text{пар}} = q_{2\text{пар}} B C_{\text{пар}} = 0,00006 \cdot 36\,000 \cdot 5,33 = 11,5 \text{ руб.}$$

2.3. Стоимость расхода электроэнергии:

$$C_{2\text{эл.эн}} = N T C_{\text{эл.эн}} = 25 \cdot 270 \cdot 0,01486 = 100 \text{ руб.}$$

2.4. Заработная плата обслуживающего персонала:

$$З_2 = \Phi m n \cdot 12 = 179,91 \cdot 1 \cdot 1 = 2158 \text{ руб.}$$

2.5. Стоимость безвозвратных потерь готового продукта:

$$C_{2\text{потерь}} = \rho_2 B C_{\text{пр}} = 0,005 \cdot 36\,000 \cdot 98,31 = 17\,695 \text{ руб.}$$

2.6. Текущие затраты по варианту внедрения:

$$C_2 = A_2 + C_{2\text{пар}} + C_{2\text{эл.эн}} + З_2 + C_{2\text{потерь}} = 4368 + 11 + 100 + 2158 + 17\,695 = 24\,332 \text{ руб.}$$

Приведенные затраты:

$$П_2 = C_2 + E_n K_2 = 24\,332 + 0,15 \cdot 24\,000 = 27\,932 \text{ руб.}$$

Экономический эффект:

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (C_1 + E_n K_1) - (C_2 + E_n K_2) = 339\,022 - 27\,932 = \\ &= 311\,090 \approx 311,1 \text{ тыс. руб.} \end{aligned}$$

3. Вариант внедрения (на программу 135 тыс. упак.)
(на производительность установки СМК — 50 кг/ч)

3.1. $A_2 = 24\,000 \cdot 0,182 = 4368 \text{ руб.}$

3.2. $C_{2\text{пар}} = 0,00006 \cdot 135\,000 \cdot 5,33 = 43 \text{ руб.}$

3.3. $C_{2\text{эл.эн}} = 25 \cdot 1000 \cdot 0,01486 = 371 \text{ руб.}$

3.4. $З_2 = 176,91 \cdot 1 \cdot 1 = 2158 \text{ руб.}$

3.5. $C_{2\text{потерь}} = 0,005 \cdot 135\,000 \cdot 98,31 = 66\,360 \text{ руб.,}$

$$C_2 = 4368 + 43 + 371 + 2158 + 66\,360 = 73\,300 \text{ руб.}$$

3.6. $C_2^{\text{уд}} = \frac{73\,300}{135\,000} = 0,54 \text{ руб/тыс. капс.,}$

$$K_2^{\text{уд}} = \frac{24\,000}{135\,000} = 0,18 \text{ руб/тыс. капс.,}$$

$$П_2^{\text{уд}} = C_2^{\text{уд}} + E_n K_2^{\text{уд}} = 0,54 + 0,15 \cdot 0,18 = 0,567 \text{ руб/тыс. капс.,}$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E} &= (C_1^{\text{уд}} + E_n K_1^{\text{уд}}) - (C_2^{\text{уд}} + E_n K_2^{\text{уд}}) \cdot B_2 = \\ &= (9,41 - 0,567) \cdot 135\,000 = 1\,193\,805 \text{ руб.} \end{aligned}$$

Экономический эффект на программу 135 тыс. капс. составит 11 94 тыс. руб.

Как видно, эти расчеты значительно отличаются. Наибольшую выгоду принесет реализация третьего варианта, т. е. применение оборудования в полной мере.

Использование аппарата СМК позволяет перевести на поточность многие процессы производства химико-фармацевтических материалов и создать новые технологии производства таблеточных форм.

Управление процессом сушки через реологические характеристики дало возможность предложить некоторые новые технологии производства гранулированных препаратов, например тетрациклина.

Производственный процесс получения таблеточных форм антибиотиков, в частности тетрациклина основания (ТЦО), состоит из ряда последовательных стадий:

центрифугирование

($\tau = 30-60$ мин, $W = 30-38\%$);

↓

сушка порошка после центрифугирования

($\tau = 30$ мин, $W = 14\%$);

↓

смешение сухого материала со связующим веществом (5%-ный крахмальный клейстер)

($\tau = 30-36$ мин);

↓

влажная грануляция,

диаметр отверстий гранулятора равен 1 мм;

сушка гранул

($\tau = 30-60$ мин,

$W = 15-17\%$);

сухая грануляция

($d = 0,3-0,6$ мм);

↓

опудривание;

↓

таблетирование.

Недостатками способа получения таблеток, например тетрациклина, являются длительность технологического цикла; нецелесообразность двукратной его сушки (после центрифугирования и после влажной грануляции), а также добавление в массу связующих веществ (в данном случае крахмального клейстера). Все это приводит к длительному воздействию на тетрациклин высокой температуры и влаги, что влияет на качество готовой продукции, нерациональному расходованию материальных ресурсов, производственных площадей, малой экономичности процесса.

Исследования структурно-механических характеристик, процессов грануляции и сушки сырой пасты ТЦО позволили предложить новую технологию получения таб-

леток тетрациклина основания. Массу тетрациклина обрабатывают в центрифуге определенное время до достижения оптимальных реологических свойств, затем гранулируют и сушат в установке СМК на матрице с диаметром отверстий 2 мм при температуре воздуха 120—140 °С и материала 60—70 °С до получения гранул с равновесной влажностью 14—17%. После этого высушенную массу опудривают обычным способом и таблетуют на таблеточных машинах.

Предложенная технология была испытана на Минском заводе медпрепаратов. В результате опытно-промышленных испытаний установлено, что масса ТЦО при обработке в центрифуге приобретает свойства условно-пластичных систем, которые характеризуются эластичностью λ , пластической вязкостью Θ , предельным напряжением сдвига η . Эти характеристики являются функцией времени обработки массы в центрифуге и свойств исходного материала.

Оптимальные показатели для обработки тетрациклина в центрифуге: время 5—10 мин; $\lambda = 0,318—0,424$; $\eta_0^* = 193—250 \cdot 10^{-8}$; $P_k = 72—129 \cdot 10^{-3}$ Н/м²; средневзвешенный диаметр гранул в полученной массе — 1,5 мм.

Таблетки, полученные из гранулята, таблетировались удовлетворительно и по всем показателям соответствовали требованиям производства.

Предлагаемая новая технология производства таблеток ТЦО позволит ликвидировать такие операции, как сушку негранулированного тетрациклина, смешение сухого тетрациклина со связующим веществом (крахмальным клейстером), приготовление крахмального клейстера и таким образом ликвидировать один цех. Выполненные работы показали возможность получения высококачественной массы без добавления крахмального клейстера при значительно сокращенном времени центрифугирования (5—6 мин вместо 30—60) [142].

На пилотных установках в ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР была доказана возможность использования предложенного комбинированного метода сушки, реализованного в сушильных устройствах СМК для ряда других продуктов. Так, испытания по получению формовочных масс катализатора конверсии окиси углерода НТК-4, проведенные в лаборатории, показали, что пилотная установка на массе катализатора работала стабильно: сырой

материал, гранулированный, высушался без нее. О ма кипения, точно интен

На основ лать заключ зования суш катализатор

На пилот перименты п ром. Началь и более. Ре входящего в выходящего душики» — 70

В результа лотная устано бильно; сырой установку, хо щем и кипяще материал нач 7 мин после з ло без каналов осуществлялас 3—4%/мин.

Следовател ваны для сушк с сушилками С сушки питател 3 раза, создают ции, снижаются вана возможнос облепили, карто металлов.

материал, непрерывно загружаемый в установку, хорошо гранулировался через матрицу с отверстиями 2 и 4 мм и высыхал как на «подушке» из сухого материала, так и без нее. Ожижение масс проходило без нарушения режима кипения и большого уноса, процесс сушки был достаточно интенсивен.

На основании проведенных экспериментов можно сделать заключение о принципиальной возможности использования сушилки СМК системы ИТМО в производстве катализаторов.

На пилотных установках были также проведены эксперименты по сушке смеси белкового гидролизата с агаром. Начальное влагосодержание смеси составляло 35% и более. Режимные параметры сушки: температура входящего воздуха — 110 °С; в слое материала — 80 °С; выходящего воздуха — 45 °С; высота плотного слоя «подушки» — 70 мм.

В результате испытаний было установлено, что пилотная установка на исследуемых массах работала стабильно; сырой материал, непрерывно загружаемый в установку, хорошо гранулировался и высыхал в падающем и кипящем слое с высокой интенсивностью; сухой материал начинал выгружаться из установки через 5—7 мин после загрузки; ожижение материала происходило без каналаобразования; выгрузка сухого материала осуществлялась свободно; скорость сушки составляла 3—4%/мин.

Следовательно, сушилки СМК могут быть использованы для сушки смесей питательных сред. По сравнению с сушилками СП, применяемыми в настоящее время для сушки питательных сред, процесс интенсифицируется в 3 раза, создаются условия непрерывности, автоматизации, снижаются потери. Таким же образом была опробована возможность применения этих аппаратов для жома облепихи, картофеля, отходов промышленности цветных металлов.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ПРОИЗВОДСТВА ГРАНУЛИРОВАННЫХ И ТАБЛЕТОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЙ ПОТОЧНОСТЬ И УПРАВЛЕНИЕ НА ОСНОВЕ НОВЫХ СПОСОБОВ СУШКИ

Производство гранулированных и таблеточных материалов широко распространено в различных отраслях промышленности (медицинской, химической, микробиологической, пищевой). Гранулированные материалы имеют ряд преимуществ: они не слеживаются, удобны при транспортировке, позволяют осуществлять строгую дозировку и улучшают ряд технологических процессов. Таблеточные формы также обладают рядом преимуществ по сравнению с порошками: их удобнее принимать, они портативны, занимают значительно меньше места, удобны для хранения и транспортировки.

В настоящее время производство этих форм состоит из целого ряда разрозненных, органически не связанных процессов, происходящих часто без достаточной точности и стабильности. Это приводит к тому, что от тех или иных обстоятельств изменяется качество продукции, нет стандартной технологии, все еще низка производительность труда и культура производства.

Современное оборудование химико-фармацевтической промышленности не позволяет полностью перейти к непрерывнодействующим технологическим линиям, так как на его основе нельзя значительно интенсифицировать энергоемкие тепломассообменные процессы и осуществить их взаимосвязь и управление.

Для большинства таблетлируемых препаратов технология производства состоит из следующих разрозненных операций: сухого перемешивания, когда лекарственный препарат смешивается с определенной порцией сухого крахмала; влажного перемешивания, когда сухие по-

рошки смеш
го гранулир
хого переме
летирования
вручную и
этих процес
и периодичн

Произво
но, и поэтом
может прин
точного цик
ность, поточ
ной и излиш
может быть
учитывать,
мую стандар
получаемо
работать ед
производства
летируемых
улучшить у
ции. Однако
ленности нет
малотоннаж
димой механ
кой материа
компонентно
ваний и един
позволяющег
ских исследо
реализации э

Технологи
ства, как ука
доемких опер
шения компо
ние химико-ф
полностью
нологической
вое оборудова
цировать про
и позволяющ
[142, 143, 145
В работе

рошки смешиваются с коллоидным материалом; влажно-го гранулирования; сушки; опудривания, т. е. вновь сухого перемешивания разных материалов, и, наконец, таблетирования. Все периодические операции производятся вручную и органически не связаны друг с другом. Связь этих процессов особенно затруднена ввиду длительности и периодичности осуществления.

Производство таблеточных материалов малотоннажно, и поэтому полная механизация на первый взгляд не может принести общеизвестных выгод непрерывного, поточного цикла. Учитывая еще определенную уникальность, поточная механизация иногда считается невозможной и излишней. Такая точка зрения, на наш взгляд, не может быть верной, так как в данном случае необходимо учитывать, что поточность позволяет создать управляемую стандартную технологию, улучшающую качество получаемого продукта лекарственных препаратов, и разработать единый алгоритм определения оптимизации производства. Непрерывная технологическая схема таблетирования лекарственных препаратов позволит также улучшить условия труда и сократить трудоемкие операции. Однако в настоящее время в медицинской промышленности нет ни одной работающей линии. Это связано с малотоннажностью производства и отсутствием необходимой механизации; некоторой уникальностью, спецификой материала (вязкостью, термолабильностью, многокомпонентностью); отсутствием теоретических исследований и единого научно-производственного комплекса, позволяющего объединенно решать вопросы теоретических исследований, создания аппаратов и практической реализации этих разработок.

Технологический процесс таблетирования производства, как указывалось выше, состоит из целого ряда трудоемких операций. Особенно трудоемки операции смешения компонентов и их сушки. Современное оборудование химико-фармацевтических заводов еще не позволяет полностью перейти к непрерывнодействующей технологической линии, поэтому необходимо создавать новое оборудование, способное в несколько раз интенсифицировать процессы, работающие по непрерывному циклу и позволяющие осуществлять регулировку процесса [142, 143, 145].

В работе [146] приведена непрерывная технология

таблетлируемых препаратов, а также описана компоновка линии, которая состоит из подъемника, дозаторов, бункеров непрерывного действия, смесителя, сушилки барабанного типа непрерывного действия, гранулятора для сухого и влажного гранулирования. Конструкции аппаратов здесь не описаны, за исключением смесителя непрерывного действия, который отличается от известных двухвальных смесителей с S-образными лопастями тем, что позволяет производить смешение компонентов в непрерывном потоке. Однако следует заметить, что ввод сушилок барабанного типа в непрерывную схему не может обеспечить интенсификацию процесса, они громоздки, плохо управляемы и отличаются большой энергоемкостью.

При создании непрерывной технологии таблетлируемых препаратов необходимо вначале выделить основной решающий процесс, который определяет поточность. Таким процессом является сушка. Поэтому выбор рационального метода сушки в данном случае во многом определяет эффективность всего непрерывного потока технологических операций.

Аппарат СМК, как было показано выше, совмещает процессы гранулирования и сушки и позволяет управлять ими. Это выгодно для случаев, когда формирование материала как объекта сушки происходит искусственно на стадии смешения и грануляции. Поэтому основной процесс сушки и мокрого гранулирования в поточной линии предложено осуществлять в этом аппарате.

Принудительное мокрое гранулирование известно давно и широко применяется в химико-фармацевтической промышленности. Необходимость получения гранулята в таблеточном производстве вызвана тем, что он обеспечивает стабильную скорость поступления материалов и их смесей в таблеточные машины и, следовательно, однородность таблеток и капсулированных доз, а также однородный состав многокомпонентных смесей. Для приготовления фармацевтических гранул применяются следующие методы: сухое и влажное гранулирование, гранулирование во взвешенном слое, распылительное гранулирование и сферонизация гранул [147, 148].

Общим недостатком всех методов является несвязанность друг с другом процессов сушки и гранулирования. Наиболее выгодна распылительная сушка, когда

жидкая вз
или друг
Обезвожи
стоянии,
гранулы.
рубежом
Однако

ния грану
Искусстве
лы до сус
Кроме тог
кость апп
унос и вы
возрастан
тельное гр
водстве до

Другим
лирование
во взвешен
образные
и затем
сушатся во
изучены С
щее время
бежом (на
ским инст
Союзе (Н
[147].

Подобн
создания
настоящего
только пер
рый не по
регулирова
исходят в о
ных услови
этих устано
ется сегрег
нен эффект
лов, потом
при смешен
но для пр
[147].

жидкая взвесь ингредиентов распыляется через сопло или другое устройство в потоке нагретого воздуха. Обезвоживание капель происходит во взвешенном состоянии, из которых образуются сферические пористые гранулы. Особое распространение этот метод получил за рубежом (фирма «Ниро атомайзер»).

Однако этот метод применяется только для получения гранулированного материала из жидких продуктов. Искусственно разбавлять твердые дисперсные материалы до суспензий для получения гранул неэкономично. Кроме того, широкому внедрению препятствует громоздкость аппаратуры, большие расходы воздуха, большой унос и высокие энергетические затраты, что приводит к возрастанию себестоимости продукта. Поэтому распылительное гранулирование используется только при производстве дорогих материалов.

Другим методом, также сочетающим сушку и гранулирование в одном аппарате, является гранулирование во взвешенном слое. Он заключается в том, что порошкообразные материалы смешиваются во взвешенном слое и затем обрызгиваются гранулирующим раствором и сушатся воздухом в кипящем слое. Такие процессы были изучены Скоттом и другими и описаны в гл. 1. В настоящее время работы в этом направлении ведутся как за рубежом (например, фирмой «Glatt», «Aeromatie», Венгерским институтом механики и др.), так и в Советском Союзе (НИИ удобрений, ЛХТИ, СПКБ Медпром и др.) [147].

Подобный процесс может послужить основой для создания поточной непрерывной технологии. Однако до настоящего времени в промышленности осуществлен только периодически последовательный процесс, который не позволяет контролировать весь процесс в целом, регулировать перемешивание и сушку, так как они происходят в одном аппарате одновременно, но требуют разных условий оптимизации (рис. 79). При использовании этих установок постоянной и серьезной проблемой является сегрегация и унос. Такой метод может быть применен эффективно только для однокомпонентных материалов, потому что сегрегация особенно сильно выражена при смешении частиц разной плотности, что характерно для производства многокомпонентных препаратов [147].

Метод сухого гранулирования основан на прессовании порошка в форме пластин или брикетов с последующим их измельчением до гранул нужного размера. Кроме того, необходимо добавление небольших количеств связующих агентов (поливинилпирролидон, полиэтиленгликоль и др.) и высокое давление. Применяется такой метод для гранулирования термолабильных веществ и веществ, разлагающихся в присутствии воды. Для полу-

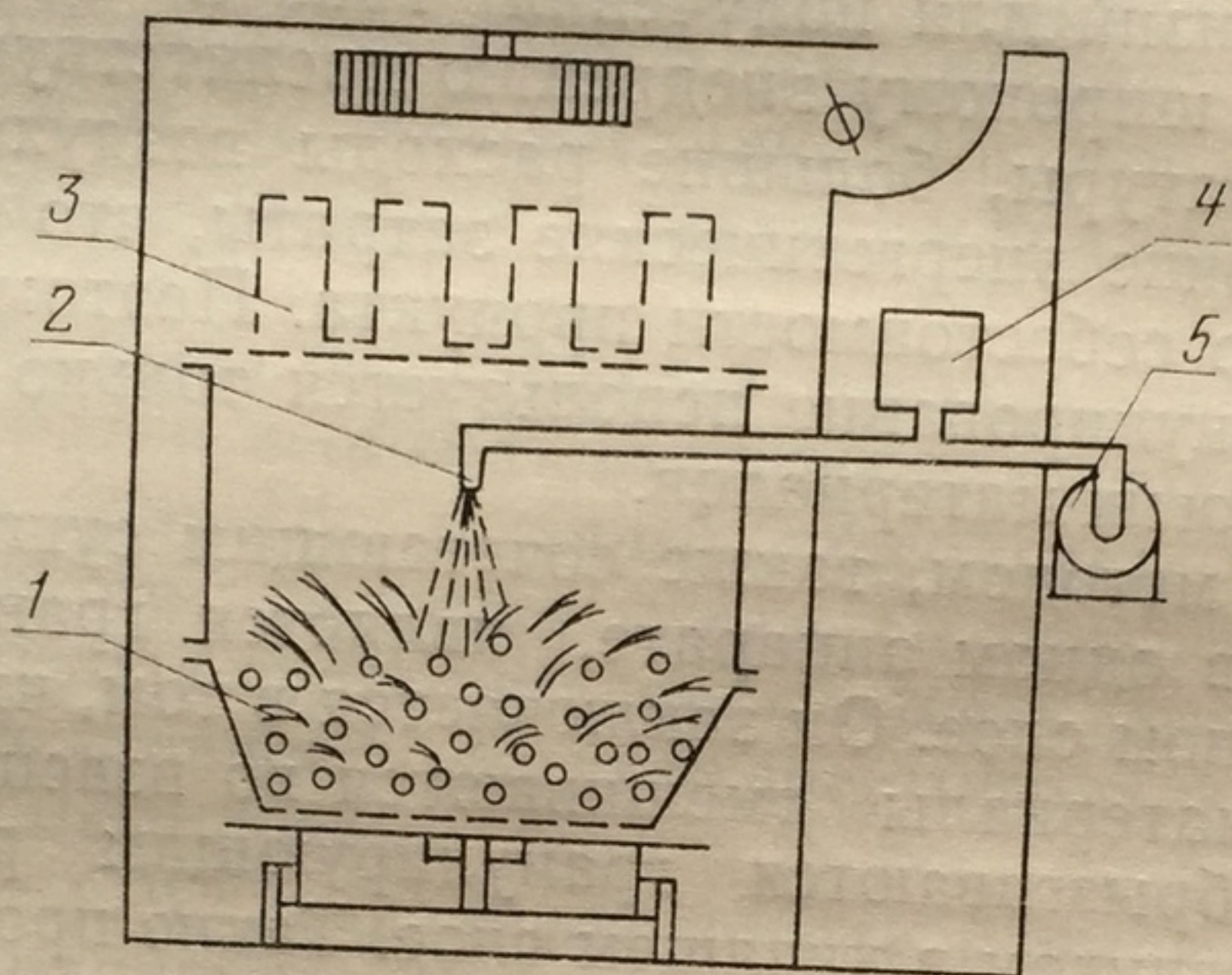


Рис. 79. Схема аппарата для гранулирования и сушки во взвешенном слое: 1 — кипящий слой; 2 — распыливающее устройство; 3 — фильтр; 4 — бачок для жидкости; 5 — вентилятор

чения гранул нужной величины брикеты, полосы материала измельчаются и просеиваются. Недостаточная изученность проблемы смешения при различных плотностях материала и отсутствие четкой формулировки наиболее распространенного диффузного механизма смешивания — недостатки данного метода. Поэтому исследования в этой области направлены в основном на эмпирическое изучение процесса смешивания в зависимости от характеристик продуктов, а также измерения и контроля сегрегации.

Для ряда материалов этот метод непригоден из-за агломерации и, следовательно, для всех когезивных порошков. Работы, посвященные созданию непрерывной поточной технологии на основе этого метода, нам не известны.

Сферонизация гранул — это метод, который преду-

сматривает
(цилиндрич
ченных вна
дополнител
таблеточн

Однород
процесса о
природой и
ми, влагосо
Процесс эт
органическо
и гранулиро
рывной, упр

Наиболее
го, принуди
состоит в см
щим раство
перфорирова

Для обесп
отверстий в
нако это зав
технологии и
получают та
смесь порош
при непрерыв
может испол
Он также соч
поддается ре
рость враще
свойства мат
новится мало
методом пока
нием наклона
шей прочност
[147, 148].

Таким обр
нуляции табле
щее время на
управляемого
гранулировани
тически все ма
и грануляции.

считывает создание сферической поверхности из разных (цилиндрических и неправильной формы) гранул, полученных вначале влажной грануляцией [147, 148]. Это дополнительный процесс к существующей технологии таблеточных форм.

Однородность размера, правильность сфер и время процесса определяются многочисленными факторами: природой ингредиентов смеси, реологическими свойствами, влагосодержанием смеси, скоростью вращения и т. д. Процесс этот может быть эффективен только в случае органической связи с предыдущим влажным смешением и гранулированием и не перспективен в создании непрерывной, управляемой технологии.

Наиболее распространенным является метод влажного, принудительного гранулирования, сущность которого состоит в смешивании ингредиентов с водой или связующим раствором и продавливанием влажной массы через перфорированную поверхность.

Для обеспечения хорошего таблетирования диаметр отверстий в грануляторе не должен превышать 2 мм. Однако это зависит от многих факторов и прежде всего от технологии и природных свойств материалов. Гранулы получают также способом обкатывания, когда сухую смесь порошков обрызгивают гранулирующим раствором при непрерывном вращении чаши [147]. Данный метод может использоваться и для непрерывного процесса. Он также сочетает процесс грануляции, сушки, но трудно поддается регулированию и управлению, так как скорость вращения чаши, угол наклона и технологические свойства материала жестко связаны и рост гранул становится мало контролируемым. Получение гранул таким методом показало, что прочность возрастает с уменьшением наклона чаши и, как правило, они отличаются большей прочностью и труднее подвергаются прессованию [147, 148].

Таким образом, анализ существующих методов грануляции таблеточных материалов показал, что в настоящее время наиболее пригодным к созданию поточного управляемого производства является метод влажного гранулирования, который позволяет обрабатывать практически все материалы и управлять процессом смешения и грануляции.

5.1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТАБЛЕТОЧНОЙ МАССЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЭФФЕКТИВНОСТЬ НЕПРЕРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА ТАБЛЕТОК

Исследование таблеточных масс как объектов сушки необходимо начинать с выявления основных характеристик, определяющих оптимальное течение главного процесса.

Нами уже отмечалось, что таблеточные массы представляют собой искусственно приготавливаемые смеси лекарственного препарата (обычно кристаллической структуры) со связующим, в качестве которого используют либо крахмальный клейстер, либо сахарный сироп и т. д. Физико-механические и структурные показатели этих материалов зависят от процесса приготовления, т. е. от режима смешения. Так, режим процесса смешения определяет форму энергии связи влаги с материалом. Коллоидное тело, распределяясь между кристаллами, взаимодействует с их поверхностью, и от того, как тонка и плотна пленка коллоида на кристалле, зависит степень взаимодействия их. Поэтому, регулируя процесс смешения, можно получить материал с различной энергией связи влаги с материалом, а значит, и различную скорость сушки.

Качество смешения в данном случае характеризуется не только равномерным распределением компонентов в объеме, но прежде всего способностью массы к гранулированию. Кристаллоколлоидные материалы представляют собой неньютоновские жидкости, и, значит, процессы формирования масс определяются реологическими свойствами, которые функционально зависят от свойств исходного лекарственного препарата, количества крахмального клейстера или другого коллоидного тела, времени перемешивания и выдержки. Все эти факторы формируют основные характеристики: предельное напряжение сдвига и коэффициент пластической вязкости. Очень важно то, что формирование реологических свойств определяет энергию связи с материалом. Длительное перемешивание приводит к стойкому образованию тонкой коллоидной пленки на кристаллах исходного вещества, и, кроме адсорбционной связи, может появляться осмотическая, что осложняет процесс удаления влаги. Таким образом, для обеспечения качества грануляции и сушки на

стадии
найти
ской в
нимали
Эти ха
нейши
массы
форми
лов, со
ных ма
Таб
гранул,
ный со
и высо
стикой
диаметр
Учит
энергию
лиза пр
оптимал
Про
ществля
занные
ская свя
его опти
цесса вл
цессы, о
жидкости
механиче
ют течен
Однако з
т. е. про
вливают д
пример к
ру и т. д.
тельные п
ляется ле
5.2. ТЕХНО
И КОНСТРУ
препарат
следующи

стадии приготовления таблеточной массы необходимо найти оптимальную величину коэффициента пластической вязкости и предельного напряжения сдвига при минимальном значении энергии связи влаги с материалом. Эти характеристики определяют эффективность дальнейших процессов. Как уже отмечалось, таблеточные массы — трехфазные дисперсные структуры, которые формируются на стадии перемешивания сухих материалов, содержащих заданное количество твердых дисперсных материалов с воздухом и жидких коллоидных.

Таблеточная масса, подвергающаяся сушке в виде гранул, должна иметь заданный оптимальный фракционный состав, который обеспечит хорошее таблетирование и высокое качество таблеток. Определяющей характеристикой в данном случае являются средневзвешенный диаметр и процентное содержание пылевых фракций.

Учитывая изложенное выше, необходимо исследовать энергию связи влаги с материалом, получаемую из анализа процесса статики сушки, реологические свойства и оптимальные технологические режимы процесса сушки.

Процесс сушки в данном поточном производстве осуществляется в аппарате СМК. Грануляция и сушка, связанные органически, не имеют жесткой связи. Органическая связь здесь обеспечивается тем, что процесс сушки, его оптимальное течение зависят от предыдущего процесса влажного смешения и гранулирования. Эти процессы, обуславливающие уровень энергетической связи жидкости с твердым скелетом, пластические, структурно-механические свойства сушеного материала, определяют течение процессов тепло- и массообмена при сушке. Однако эта органическая связь не имеет жесткой связи, т. е. процессы, имея свои оптимальные параметры, не влияют друг на друга через один и тот же фактор, например количество подаваемого воздуха, его температуру и т. д. Таким образом, эти процессы имеют самостоятельные параметры и управление всем циклом осуществляется легко и гибко.

5.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СХЕМА И КОНСТРУКТИВНЫЕ УЗЛЫ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ

Для большинства химико-фармацевтических препаратов технология производства таблеток состоит из следующих разрозненных операций: взвешивания исход-

ного материала; приготовления связующего; смешивания исходной массы с крахмальным клейстером; влажного гранулирования; сушки; сухого гранулирования; опудривания; таблетирования.

Последовательность операций на большинстве предприятий осуществляется таким образом.

Отдельные компоненты исходного материала взвешиваются вручную, затем пересыпаются в смеситель, куда также вручную загружается связующее. Приготовление связующего происходит в заварочном котелке периодического действия.

После этого масса перемешивается в течение 15—20 мин в смесителе и выгружается в приемный бункер, из которого переносится в гранулятор для гранулирования. Полученный гранулят собирается в бункере-тележке и подвозится к сушилкам периодического действия (полочные, барабанные или сушилki кипящего слоя периодического действия), где вручную загружается.

Время сушки на полочных сушилках для разных препаратов колеблется от 2 до 40 ч и более, в сушилках кипящего слоя — 0,5—1 ч. Температурные режимы сушки независимо от материала поддерживаются на уровне 50—60 °С. После сушки материал вручную выгружается и с помощью тележки транспортируется на сухую грануляцию. Затем сухой гранулят загружается в опудриватель периодического действия, куда добавляется определенное количество опудривателя (тальк, стеарат). После 20—30 мин опудривания материал выгружается в приемные бункера-тележки и транспортируется к таблеточным машинам.

Таким образом, существующая технология производства таблетлируемых химико-фармацевтических препаратов отличается достаточно большой длительностью всего процесса и процесса сушки особенно. Она не позволяет организовать непрерывный поток, интенсифицировать происходящие процессы, избавиться от вредностей производства и ручного труда, осуществить регулировку процесса и улучшить качество выпускаемой продукции.

Поэтому создание непрерывного технологического потока при производстве таблетлируемых химико-фармацевтических препаратов является задачей, которая в настоящее время может быть решена объединением разрознен-

ных опер
основе и
ла с кра
действия
одновремен
узлом по
тором), с
лировании
пящем сл
парате не
таблеточн

Такое
возможность
временные
таблетиру
ного клей
10%-ного
происходит
90—100 °С

ных операций в единый последовательный процесс на основе интенсивного смешения сухого исходного материала с крахмальным клейстером в смесителе непрерывного действия (смеситель непрерывного действия выполняет одновременно функцию связывающего звена между узлом подготовки влажной массы и сушилкой-гранулятором), совмещения в одном аппарате влажного гранулирования с интенсивным методом сушки в падающе-кипящем слое, непрерывного опудривания гранулята в аппарате непрерывного действия и его транспортировки к таблеточным машинам [145].

Такое объединение разрозненных процессов дает возможность перейти на новые рецептурные, термические и временные режимы. Так, например, при производстве таблетированного норсульфазола вместо 40% крахмального клейстера в смесь может добавляться 15—20% 10%-ного крахмального клейстера. Сушка вместо 6—8 ч происходит за 7—15 мин при температуре гранулята 90—100 °С.

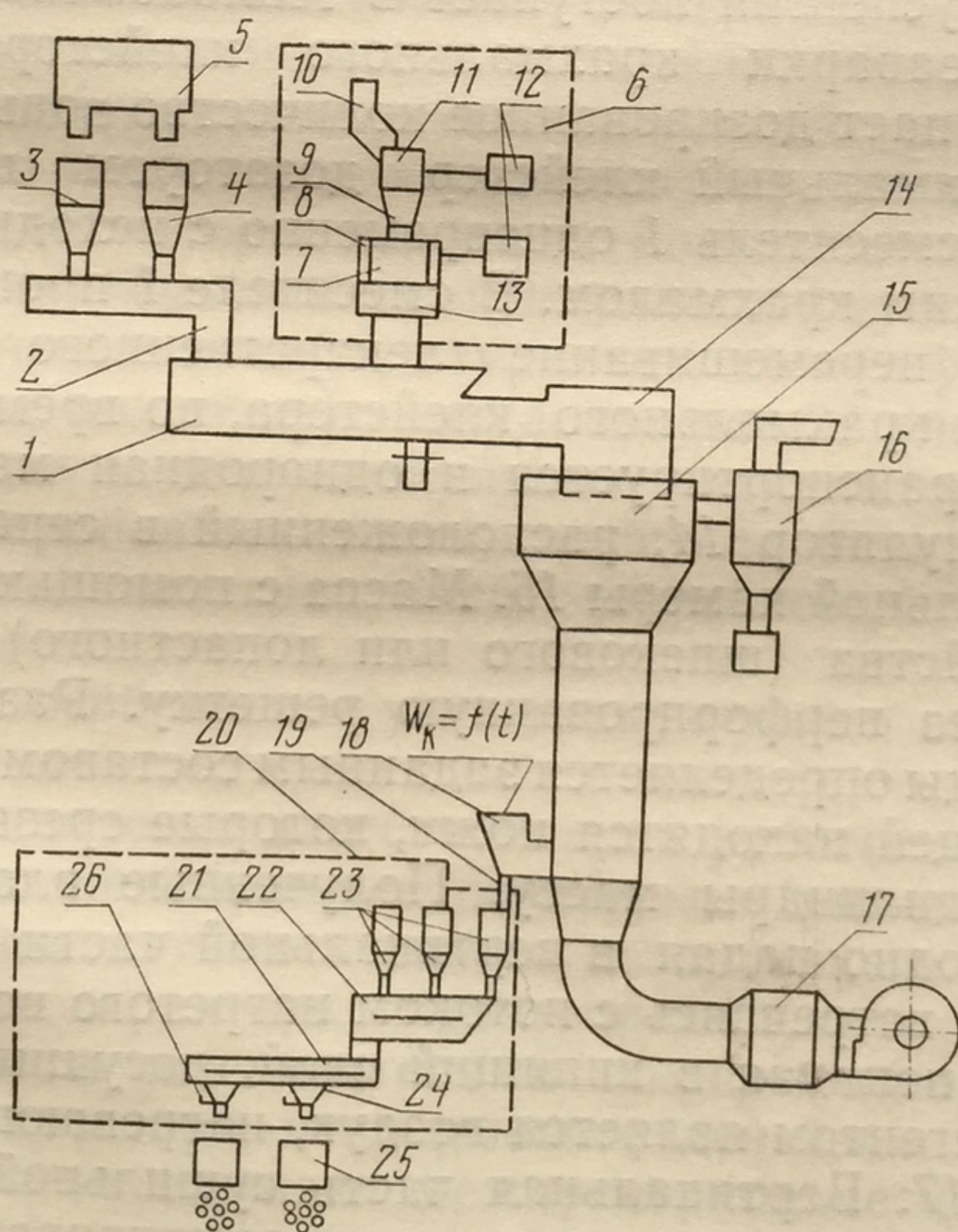


Рис. 80. Схема поточной линии производства таблетированных препаратов (ЛП-1)

Непрерывный процесс сушки влажного гранулята в падающе-кипящем слое позволяет получить гранулят, содержащий строго определенное количество остаточной влаги, что обеспечивает хорошее качество таблеток, а непрерывный процесс выгрузки сухого гранулята — контролировать влагосодержание по конечной температуре материала в течение всего процесса.

Схема механизированной поточной линии (ЛП-1) приведена на рис. 80. Исходное сырье талью или другим транспортным устройством подается в бункер-накопитель 5, который транспортирует его в весовой дозатор 2, 3. Дозатор непрерывно дозирует материал в смеситель 1. В этот же смеситель поступает крахмал из объемного дозатора 4 и связующий материал (крахмальный клейстер или сахарный сироп) из клейстеризатора 7, имеющий обогрев 8.

Для приготовления связующего материала сухой крахмал и воду с $t=20^{\circ}\text{C}$ дозируют с помощью дозаторов 10 и 12 в смеситель 11, и из него дозатором 9 приготовленная суспензия поступает в теплообменник для непрерывной заварки крахмального клейстера 13, куда также поступает дозированное количество воды с $t=90-100^{\circ}\text{C}$. Крахмальный клейстер дозатором непрерывно подается в смеситель 1 одновременно с исходным препаратом и сухим крахмалом. В смесителе 1 происходит непрерывное перемешивание лекарственного препарата, крахмала и крахмального клейстера, во время которого материал транспортируется и однородная масса поступает в гранулятор 14, расположенный в сепарационной части сушильной камеры 15. Масса с помощью специального устройства (шнекового или лопастного) продавливается через перфорированную решетку. Размер отверстия матрицы определяется заданным составом гранулята. Под матрицей находятся ножи, которые срезают оформленную в цилиндры массу. Полученные влажные гранулы, свободно падая в вертикальной части сушильной камеры 15, встречаясь с потоком нагретого воздуха, подсыхают и, попадая в кипящий слой, досушиваются. Сушильным агентом является воздух, нагревающийся в калорифере 17. Вертикальная часть сушильной установки служит не только для подсушки гранулированного материала, но и для фильтрации запыленного воздуха, проходящего через кипящий слой. Мелкая фракция, обра-

зующая
нулами
в резул
ный во
окончат
матери
тель 19.
зируются
кислота.
скребок
26 табле
Меха
рукции,
слесарем
таблеток
Линия
прерывно
гом и ско
ходного с
тер); при
исходных
приготовл
крахмалы
смешивани
щего мате
лятор, суш
лятор, гру
хого грану
крахмал, с
транспорти
тер).
Основны
саны в [143
Большое
ют правиль
или иного т
ва зависит
Так, для ра
необходимы
ном случае
онной подач
сителя не до
Эксперим

зующаяся в кипящем слое, встречаясь с влажными гранулами в вертикальной части аппарата, оседает на них, в результате значительно уменьшается унос. Отработанный воздух проходит через циклоны 16, где подвергается окончательной очистке. Высушенный гранулированный материал турникетом 18 выгружается в бункер-накопитель 19. Одновременно в смеситель-опудриватель 22 дозируются из дозаторов 23 тальк, крахмал, стеариновая кислота. Опудренный гранулят непрерывно подается скребковым транспортером 21 в приемные бункера 24, 26 таблеточных машин 25.

Механизированная поточная линия проста по конструкции, обслуживается одним оператором и дежурным слесарем, время изготовления из исходного материала таблеток составляет 15—20 мин.

Линия состоит из ряда устройств, работающих в непрерывном режиме, органически связанных друг с другом и скомпонованных в следующие узлы: загрузки исходного сырья (тальк, бункер — накопитель — транспортер); приготовления связующего материала 6 (дозаторы исходных компонентов, воды, крахмала, смеситель для приготовления суспензии, теплообменник для заварки крахмального клейстера, насос-дозатор); дозирования и смешивания (дозаторы исходных компонентов, связующего материала, смеситель); грануляции и сушки (гранулятор, сушильная камера, турникет, калорифер, вентилятор, группа циклонов); опудривания 20 (дозатор сухого гранулята и вспомогательных материалов — тальк, крахмал, стеариновая кислота, смеситель, опудриватель); транспортирования гранулята (скребковый транспортер).

Основные особенности узла грануляции и сушки описаны в [143].

Большое значение для стабильной работы линии имеют правильно подобранные дозаторы. Применение того или иного типа автоматического дозирующего устройства зависит от характера производственного процесса. Так, для работы со смесителями непрерывного действия необходимы дозаторы непрерывного действия, в противном случае из-за неувязки между периодической порционной подачей материалов и непрерывной работой смесителя не достигается однородности смеси и всего цикла.

Экспериментальные исследования позволили выбрать

соответствующие дозирующие устройства для введения их в поточную линию. Дозатор марки ДН-21У Орехово-Зуевского завода «Прибордеталь» является наилучшим для дозировки кристаллического лекарственного препарата. Производительность колеблется от 40 до 160 кг/ч. Погрешность дозировки $\pm 3\%$. Для дозировки крахмала и талька использовался тарельчатый дозатор производительностью 2—45 кг/ч, а для дозировки стеариновой кислоты — дисковый — производительностью 0,5 кг/ч. Достоинство конструкции тарельчатого дозатора — удобство настройки и регулировки дозатора, что дает возможность тщательно регулировать его производительность и подавать материал с небольшими отклонениями от заданного количества.

Процесс смешения кристаллоколлоидных веществ имеет свои особенности. Считают, что эффект перемешивания веществ, отличающихся различными физико-механическими свойствами, прямо пропорционален времени перемешивания. Однако в данном случае этого не наблюдается. Эксперименты, проведенные с таблеточными массами, показали, что подобные материалы в результате длительного перемешивания приобретают большую вязкость и текучесть, что не обеспечивает в дальнейшем нормального процесса грануляции и сушки. Поэтому основной задачей является получение равномерно перемешанной, но рыхлой массы. Для осуществления такого перемешивания нами были исследованы смесители шнекового и лопастного типов. В результате экспериментов было установлено, что эти смесители не дают хорошего качества смешивания и масса становится малопригодной для дальнейшего ее использования. Кроме того, в лопастном смесителе наблюдались неравномерность смешивания, залипание крахмального клейстера на днище корпуса и на лопастях.

В результате длительных испытаний установлена пригодность для таблеточных масс принципа двухвалковой самоочищающейся системы, в основу которой положена реакторно-смесительная машина СН-63, СН-100.

Смеситель состоит из корпуса с двумя параллельно расположенными шнеками. Шнеки вращаются с одинаковыми скоростями в одном направлении. Кривая, образующая профиль витков, выбрана такой, что в процессе работы они взаимно очищаются от налипающих переме-

шиваемых м
имеющем в
двух пересе
живания кор

К корпусу
подвода кле
ственного ил
имеется окн
имеет обратн

В узел см
риатор, элек
ется насосом
вания (норсу
весового доз

сителя от от

количествах

крахмального

прерывного д

крахмальной

рая заключен

проходит вал

ной суспензии

нию воронки

зии. Камера с

стоянного уро

подвода сухог

соответствующ

ен насос для

штуцеры для

крахмала. Ве

кроме аппара

дисковый доз

воды. Вода на

Принцип ра

материалов ра

в [149].

Основная

представляет с

торой прикреп

результате пер

бы, а спираль

териал, пересы

выходному

шиваемых материалов. Шнеки вращаются в корпусе, имеющем в поперечном сечении геометрическую форму двух пересекающихся окружностей. Для удобства обслуживания корпус спроектирован разъемным.

К корпусу питающей зоны приварены штуцер для подвода клейстера и горловина для подачи массы лекарственного или витаминного препарата. В зоне выгрузки имеется окно для готовой массы. Шнек за этим окном имеет обратные витки.

В узел смесителя входят редуктор-раздвоитель, вариатор, электродвигатель ($N=1,5$ кВт). Клейстер подается насосом-дозатором НРМ-2, а препарат для смешивания (норсульфазол) — от автоматического серийного весового дозатора ДН-21У. В приемную горловину смесителя от отдельного дискового дозатора в небольших количествах поступает сухой крахмал. Для заварки крахмального клейстера был рекомендован аппарат непрерывного действия, состоящий из камер приготовления крахмальной суспензии с мешалкой и заварочной, которая заключена в рубашку обогрева. Через обе камеры проходит вал. Стенки камеры приготовления крахмальной суспензии имеют ребра, препятствующие образованию воронки при перемешивании крахмальной суспензии. Камера снабжена устройством для поддержания постоянного уровня суспензии, а также штуцерами для подвода сухого крахмала и слегка подогретой воды от соответствующих дозаторов. В заварочную камеру встроен насос для нагнетания крахмального молочка, а также штуцеры для подвода горячей воды и выхода готового крахмала. Весь блок заварки крахмального клейстера, кроме аппарата собственной заварки, включает в себя дисковый дозатор крахмала, дозаторы теплой и горячей воды. Вода нагревается в специальных бачках.

Принцип работы опудривателя (смесителя для сухих материалов различного фракционного состава) приведен в [149].

Основная деталь аппарата (камера смешения) представляет собой трубу, к внутренней поверхности которой прикреплена спираль. Опудривание происходит в результате пересыпания материала при вращении трубы, а спираль играет роль транспортного устройства: материал, пересыпаясь и перемешиваясь, продвигается к выходному патрубку. В опудриватель через дозатор

ДН-21У подаются сухой гранулят, через дисковые дозаторы — тальк, стеариновая кислота, сухой крахмал, а к таблеточным машинам — опудренная масса через технику — транспортирующим устройствам.

5.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ РАБОТЫ ПОТОЧНОЙ ЛИНИИ, РЕЗУЛЬТАТЫ ОПЫТНО-ПРОМЫШЛЕННОГО ОСВОЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ

В предлагаемой нами механизированной линии производства готовых форм исходное качество лекарственного препарата (обычно кристаллический порошок), крахмал и другие вещества определяются обычными способами контроля производства на заводах.

Технологический цикл при налаженной, стабильной работе определяется режимами работы дозаторов (точность дозировки $\pm 2,3\%$), работой непрерывного смесителя, режимами сушильного процесса (температура воздуха, массовая скорость, время пребывания материала в реакционной зоне).

Режим смешивания (например, для норсульфазола) проверялся лабораторными и эксплуатационными испытаниями непрерывного смесителя, рассчитанного на проектную производительность (100 кг/ч). Найдены оптимальные параметры работы смесителя (число оборотов — влажность материала), которые позволяют получать равномерно перемешанную массу с рыхлой консистенцией, обеспечивающей удовлетворительное гранулирование и распределение крахмального клейстера в исходной массе. Количество добавок в массе проверялось по влажности и процентному содержанию крахмала в сырой массе, полученной в течение длительного времени работы смесителя.

В процессе исследования были установлены оптимальные режимы сушки, обеспечивающие содержание остаточной влаги в грануляте, равное равновесному ее содержанию, и получение фракционного состава с соответствующим средневзвешенным диаметром, равным $d = 1,5$ мм. Такими параметрами являются температура входящего сушильного агента (140°C), массовая скорость ($\nu_p = 1,2 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$), высота слоя ($h = 250$ мм), степень перфорации удерживающей решетки (3%), диа-

метр отве
лись стаб
СМК.

При н

получаем

ляется за

нем в су

нормальн

ров. Конт

5, 10, 20 м

смешиван

опудриван

после таб

ляется по

методом,

высушенн

ными мето

В ИТМ

методы ко

роскопии

(СФРС)

Для о

нием опти

спектрофо

рок, работ

ма, пресс

образцов

таллов; пр

анализов с

Работа

мещении

ность 40—

здаваемых

ми. Из хи

мы порош

или получ

кристалло

Для ан

ИК-спектр

дуемых пр

а с испол

меньше).

Первый

12. Зак.

метр отверстий (2 мм). Заданные режимы выдерживались стабильно при бесперебойной работе сушилки типа СМК.

При налаженной, нормальной работе линии качество получаемых полупродуктов и готового продукта определяется заданными параметрами: температурным уровнем в сушилке, постоянным числом оборотов смесителя, нормальной работой аппарата клейстеризации и дозаторов. Контроль за процессом может осуществляться через 5, 10, 20 мин путем отбора проб из четырех точек (после смешивания — из смесителя, сушки — из турникета, опудривания — из опудривателя, таблетирования — после таблеточных машин). Качество смешения определяется по анализу на влажность обычным или экспресс-методом, процентное содержание, вязкость, подлинность высушенного гранулята и пригодность таблеток — обычными методами [154].

В ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР разработаны методы контроля с использованием инфракрасной спектроскопии и спектрофотометрии рассеивающих сред (СФРС) [94, 95, 150—153].

Для определения препаратов в смесях с использованием оптической аппаратуры необходимы инфракрасные спектрофотометры типа ИКС-14,22, а также других марок, работающих по двухлучевому принципу; пресс-форма, пресс с общим усилием до 40 т для приготовления образцов в виде таблеток с галогенидами щелочных металлов; приставки ПМО или ИПО-22 для проведения анализов с малыми количествами веществ.

Работа на спектрометрах должна производиться в помещении (температура 18—30 °С, относительная влажность 40—80%), свободном от сотрясений и помех, создаваемых работающими электромагнитными установками. Из химических реактивов и растворителей необходимы порошки KBr, KCl, NaCl, марки «оптические чистые» или полученные размельчением соответствующих монокристаллов.

Для анализа фармацевтических веществ методом ИК-спектроскопии нужно небольшое количество исследуемых препаратов (в ряде случаев достаточно 1—2 мг, а с использованием микрооптики в приборах даже меньше).

Первый этап анализа — ознакомление со спектрами

смеси и отдельных компонентов (если известен качественный состав), затем — выбор аналитической полосы поглощения, которая должна быть свободна от поглощения других компонентов и характеризоваться соответствующими значениями показателя поглощения, определяющими точность анализа.

Наиболее простым является анализ смеси нескольких невзаимодействующих веществ, каждое из которых может быть получено по отдельной изолированной полосе поглощения. Такой анализ можно производить и на однолучевом приборе. Например, на ИКС-21 записывают контур выбранной полосы анализируемого вещества и ряда смесей одинакового с образцом состава. Содержание вещества в образце определяют непосредственным сравнением интенсивности полос. На двухлучевом приборе получается градуировочная зависимость пропускания T от концентрации анализируемого вещества в смесях, т. е. строится график $C=f(T)$, далее измеряется пропускание исследуемой смеси и по графику находят C . Лучше использовать зависимость оптической плотности от концентрации, так как в этом случае зависимость $D(C)$ линейна.

Проведенный анализ состава компонентных смесей (пиранал, пирамеин, асфен и др.) в процессах смешивания, сушки и т. д. отличается высокой точностью (максимальная ошибка составляет около 1%). Применяется также метод приготовления образцов в виде таблеток с галогенидами щелочных металлов (KBr, KCl, NaCl). Спектр в таком методе регистрируется в области 400—3600 см⁻¹. Выбор полос для анализа производится в каждом случае отдельно. Например, аспирин в смеси «асфен» можно определить по полосам 424, 438, 563, 665, 884, 1575, фенацетин — 1330, 2935 см⁻¹.

Как показывают эксперименты, количественный анализ образцов, приготавливаемых в виде суспензий на вазелиновом масле можно быстро и надежно проводить по методу базисной линии. На рис. 81 показана кривая поглощения пиранала в области волновых чисел 700—850 см⁻¹. Полоса при $\nu=805$ см⁻¹ соответствует амидопирину. Через кривую поглощения проводят базисную линию (при наличии соседних полос поглощения она проводится от горба к горбу). Через точку P на прямой PQ , соответствующей волновому числу максимума поглоще-

ния анализи
на была бы
тором содер
ние полос

а оптическую

Тогда

где ka — по
центрация; d
слож к обра
внутреннего
лосой погло
компонентов
стандартов m
 $=2100$ см⁻¹)

Как показ
быстро и над
цов, приготав
масле.

Более точ
тических плот
ностей, сколь
нентами. Для

Рис. 81. Кривая
12*

ния анализируемого компонента (амидопирин), должна была бы проходить кривая поглощения образца, в котором содержание амидопирин равно нулю. Пропускание полосы при $\nu = 805 \text{ см}^{-1}$ получают из выражения

$$T_A = J_x / J_A, \quad (91)$$

а оптическую плотность —

$$D_A = \lg \frac{J_A}{J_x}. \quad (92)$$

Тогда

$$D_A = kaCd, \quad (93)$$

где ka — показатель поглощения амидопирин; C — концентрация; d — толщина слоя. Для нахождения толщины слоя к образцу добавляют определенное количество внутреннего стандарта, обладающего специфической полосой поглощения на волновом числе, где ни один из компонентов не поглощается. В качестве внутренних стандартов можно использовать роданистый калий ($\nu_s = 2100 \text{ см}^{-1}$) и карбонат калия ($\nu_s = 875 \text{ см}^{-1}$).

Как показывают эксперименты, этим методом можно быстро и надежно (ошибка 3%) проводить анализ образцов, приготавливаемых в виде суспензий на вазелиновом масле.

Более точным является анализ по методу разности оптических плотностей. При этом составляется столько разностей, сколько их обусловлено исследуемыми компонентами. Для смеси амидопирин с кофеином (пирамеин)

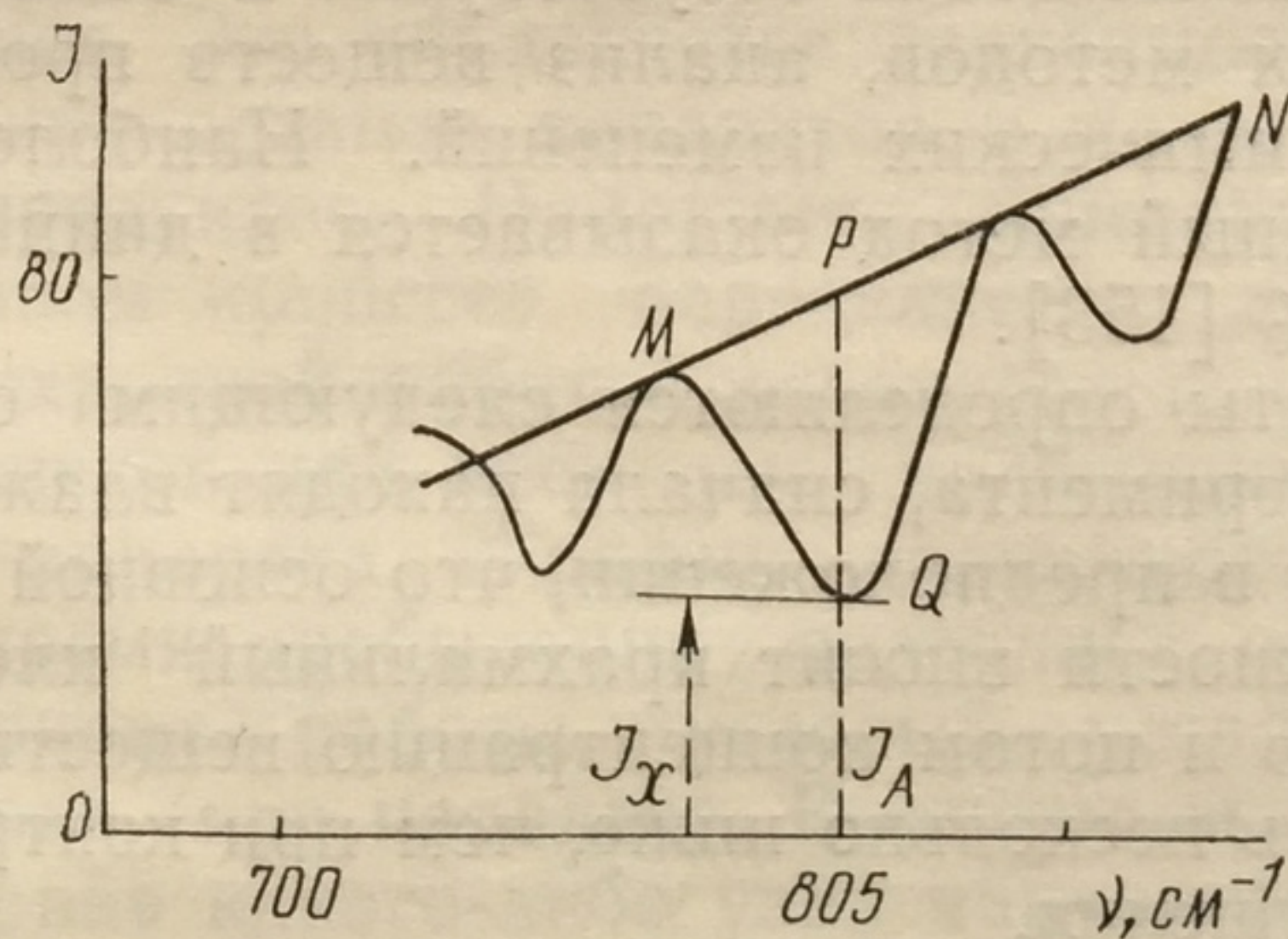


Рис. 81. Кривая поглощения пиранала. Количественный анализ по методу базисной линии

разности составлялись на следующих волновых числах: $\nu_1=483 \text{ см}^{-1}$, $\nu_2=445 \text{ см}^{-1}$, $\nu_3=427 \text{ см}^{-1}$. Поглощение на $\nu_2=445 \text{ см}^{-1}$ общее для обоих компонентов. С увеличением числа компонентов в смеси анализ становится более трудоемким и менее точным. Невозможно подобрать аналитическую полосу, почти все перекрываются. Анализ трехкомпонентных смесей, например по методу базисной линии, приводит к большим погрешностям. Лучшие результаты получаются с помощью компенсационного метода, который можно проводить для тройчатки и других смесей.

Описанные выше методики для контроля качества смешения применяются для смешивания сухих материалов. Наличие влаги и других жидкостей в материале осложняет контроль. В этих случаях должны применяться другие методики.

В производстве таблетлируемых препаратов представляет интерес нахождение концентрации вещества в таблетлируемой смеси, где присутствует само вещество (крахмальный клейстер и др.). Для оценки концентрации вещества и крахмального клейстера целесообразно использовать метод определения влажности, предложенный в ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, основанный на исследовании спектрального отражения влажных материалов в инфракрасной области спектра, позволяющий найти количество воды, а также других жидкостей. Суть метода — сравнение интенсивности спектрального отражения на частоте деформационных колебаний воды, т. е. там, где она сильно поглощает, и на соседнем участке, где полосы поглощения отсутствуют. В отличие от некоторых других методов, анализ веществ проводится без структурно-химических изменений. Наиболее чувствительным данный метод оказывается в диапазоне влажности 1—20% [153].

Компоненты определяются следующим образом. По данным эксперимента, сначала находят влажность материала, затем в предположении, что основной вклад в величину влажности вносит крахмальный клейстер, — содержание его и потом концентрацию вещества. Точность анализа здесь несколько ниже, чем при контроле качества сухого смешения.

Предложенная новая, непрерывная технология производства таблеток была реализована в поточной меха-

низированной
«Здоровье тру
ИТМО им. А
ческую возмо
линий для п
на норсульфа
ществить непр
нальную (опт
ток. Механиз
да в действие
всем показате
ческому циклу
ная грануляц
органически
герметических
режимных пар
изводиться ди

Постадийн
прерывной ра
мальный клей
способности к
ственным треб
ционному сост
ветствует треб
ляту норсульф
фармакопей Х

На линии б
ла. Первый оп
леток показал
надобность в
дуктов отпада
работой рабоч
чаемых полуп
при непрерывн
смесителя син
ротов двух шн
рабочей зоне
смешения — вр
мальный вари
только один ра
жимного граф
ные парамет
стояние

низированной линии, освоенной на Харьковском заводе «Здоровье трудящимся». Совместная работа завода и ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР показала техническую возможность и целесообразность создания таких линий для производства таблеток. Линия испытывалась на норсульфазоле. Она работоспособна, позволяет осуществить непрерывный процесс и найти наиболее рациональную (оптимальную) технологию производства таблеток. Механизированная линия отличается быстротой ввода в действие, стабильностью режимных параметров по всем показателям. Процессы, проходящие по технологическому циклу (сухое, влажное смешение, принудительная грануляция, сушка, опудривание), взаимосвязаны и органически определяют друг друга, осуществляются в герметических условиях и позволяют наладить контроль режимных параметров. Обслуживание линии может производиться дистанционно, с пульта управления.

Постадийный контроль качества продукции при непрерывной работе поточной линии показал, что крахмальный клейстер, смешение, опудренный гранулят по способности к таблетированию удовлетворяют производственным требованиям; гранулят после сушки по фракционному составу и конечному влагосодержанию соответствует требованию, предъявленному к сухому грануляту норсульфазола; качество таблеток отвечает Госфармакопее X-го издания.

На линии было переработано около 5 т норсульфазола. Первый опыт освоения поточности в производстве таблеток показал, что при налаженной, нормальной работе надобность в непрерывном постадийном контроле продуктов отпадает. Это объясняется зависимостью между работой рабочих органов аппаратов и качеством получаемых полупродуктов. Например, качество смешения при непрерывном процессе определяется для данного смесителя синхронной работой дозаторов и числом оборотов двух шнеков или временем пребывания массы в рабочей зоне аппарата. График зависимости качество смешения — время пребывания позволяет найти оптимальный вариант работы, который устанавливается только один раз (при наладке). В случае выхода из режимного графика какого-либо узла нарушаются режимные параметры всей линии и фиксируется нерабочее состояние потока. Поэтому качество продукции зависит от

нормальной работы всех основных узлов линий, под которой следует понимать сохранение заранее найденных зависимостей время пребывания в смесителе — влажность; температура материала — влажность продукта при синхронной работе дозирующих устройств. Органическая связь процессов смещения в линии позволяет с помощью основных технологических свойств полупродуктов на каждой стадии получить оптимальные режимные параметры работы всего цикла. Такими технологическими свойствами являются пластическая вязкость, предельное напряжение сдвига, влагосодержание, сыпучесть, средневзвешенный диаметр гранулята. Все эти величины находятся в определенной зависимости от режимных параметров. Конечное влагосодержание продукта контролируется высотой кипящего слоя и температурой материала на выходе из сушилки. С помощью зависимости влагосодержание — температура материала по температуре, контролируемой в процессе, можно определить конечное влагосодержание продукта в процессе всего цикла. Некоторые данные по эксплуатации поточно-механизированной линии приведены в табл. 10 приложения 1.

В процессе эксплуатации были выявлены основные характеристики работы, позволившие определить экономическую эффективность линии. Для норсульфазола она составила 83 тыс. руб. При использовании поточного производства будут удовлетворены все требования, предъявляемые к организации фармацевтического производства и к контролю качества лекарственных препаратов и готовых фармацевтических продуктов, принятые Комитетом экспертов Всемирной Ассамблеи здравоохранения (ВОЗ).

Таким образом, использование поточно-механизированной линии в таблеточном производстве даст следующие преимущества: 1) полную механизацию процессов производства; 2) герметичность процессов; 3) сокращение потерь и улучшение условий труда; 4) улучшение качества продукции; 5) возможность создания оптимальной стандартной технологии для основной номенклатуры лекарственных препаратов.

Перспектива внедрения предлагаемой линии предусматривает использование ее для достаточно широкого класса таблетлируемых лекарственных препаратов. Одна-

ко грануляция
тивно может п
щих при разны
быть использо
многокомпонен
применение пр
чивается испол
ности. Как пок
им. А. В. Лыко
ного Института
поточно-механи
вана в произво
удобрений.

ко грануляция некоторых препаратов достаточно эффективно может происходить на основе различных связующих при разных условиях работы цикла. Линия может быть использована как для однокомпонентных, так и многокомпонентных препаратов. Следует отметить, что применение предложенного поточного цикла не ограничивается использованием его в медицинской промышленности. Как показали исследования, проведенные ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР и Филиалом Государственного Института азотной промышленности, предложенная поточно-механизированная линия может быть использована в производстве катализаторов для минеральных удобрений.

Характеристика сушилок системы ИТМО

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d, \text{мм}^*$	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
Комбинированная сушилка непрерывного действия (тип СМК). Выпускается серийно Пензенским заводом ДХО	$5000 \times 3500, \times 5500, 500$	100	Норсульфазол	Кристалло-коллоидная (творогообразная-I)	25	0,5
			Амидопирин	Кристалло-коллоидная	15	0,68
СМК для мягкого гранулирования	$5000 \times 3500 \times 5500, 500$	100	Медицинская аскорбиновая кислота (таблеточная масса МАК)	Кристалло-коллоидная (рассыпчатого творога-II)	12	0,5
		50	Рибофлавин	Кристалло-коллоидная II	40	0,75
		50	Тетрациклин	То же	30	18

для химико-фармацевтических препаратов

Таблица 1

Температура, °C		Напряжение по испаренной влаге		Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено), тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушильной камеры, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$	ккал тепла, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$				
140	70	57	183	50	803,5	0,4	Харьковский завод «Здоровье трудящихся» (Сушилка работает в поточной линии производства таблеток)	83	73
95	45	27	86	83	810	0,28			
120	80	25,4	81,6	55	904	0,3	Уманский витаминный завод	21	70
130	80		150			0,28	Белгородский витаминный комбинат	56	
130	50	13,5	80,1	58,8	806	0,28	Минский завод медпрепаратов	20	72

ПРИЛО

ЖЕНИЕ 1

Характеристика сушилок системы ИТМО

для химико-фар

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d, \text{мм}^*$	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
Комбинированная сушилка непрерывного действия (тип СМК). Выпускается серийно Пензенским заводом ДХО	$5000 \times 3500, \times 5500, 500$	100	Норсульфазол	Кристаллоколлоидная (творогообразная-I)	25	0,5
			Амидопирин	Кристаллоколлоидная	15	0,68
СМК для мягкого гранулирования	$5000 \times 3500 \times 5500, 500$	100	Медицинская аскорбиновая кислота (таблеточная масса МАК)	Кристаллоколлоидная (рассыпчатого творога-II)	12	0,5
	$5000 \times 3500 \times 5500, 500$	50	Рибофлавин	Кристаллоколлоидная II	40	0,75
	$5000 \times 3500 \times 5500, 500$	50	Тетрациклин	То же	30	18

Температура, °C	
теплоносителя	в слое материала
140	70
95	45
120	80
130	80
130	50

ЖЕНИЕ 1

Таблица 1

для химико-фармацевтических препаратов

Температура, °С		Напряжение по испаренной влаге		Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено), тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушильной камеры, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$	ккал тепла, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$				
140	70	57	183	50	803,5	0,4	Харьковский завод «Здоровье трудящимся» (Сушилка работает в поточной линии производства таблеток)	83	73
95	45	27	86	83	810	0,28			
120	80	25,4	81,6	55	904	0,3	Уманский витаминный завод	21	70
130	80		150			0,28	Белгородский витаминный комбинат	56	
130	50	13,5	80,1	58,8	806	0,28	Минский завод медпрепаратов	20	72

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d$, мм	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
СМК для мягкого гранулирования	$5000 \times 3500 \times 5500$, 500	50	Никотиновая кислота	Кристалло-коллоидная II	29,6	0,005
СМ-3 (опытный образец)	$4300 \times 3500 \times 5500$, 1100	75	Гидрат-ди-ацетон 2-кето-1-гулоновой кислоты	Кристаллическая	15	0,5
СМК для кристаллических материалов	$5000 \times 3500 \times 5500$, 500	100	МАК	Кристаллическая рассыпчатая	6,34	0,06
	$5000 \times 3500 \times 5500$, 500	50	Азорибитил-амин**	Кристаллическая	50	0,5
	$5000 \times 3500 \times 5500$, 500	50	Барбитуровая кислота	То же	30	0,2
	$4340 \times 3500 \times 5500$, 1100	300	Сорбоза	»	6	0,2
	$2500 \times 1000 \times 1500$, 156	2—20	Пиперазин, Фтивазид	Кристалло-коллоидные	30—55	0—0,5
СМК серийная			Диклоксацилин, Левомецитин			
СМК пилотная			Аминалон и др.			
			Жом облепихи	Маслянистопастообразная	57,8	4,9

Продолжение табл. 1

Температура, °C		Напряжение по испаренной влаге		Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено) тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушильной камеры, $\frac{кг}{м^3 \cdot ч}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$	теплоносителя, $\frac{кг}{кг \cdot вл.}$	к кал. тепла, $\frac{кг \cdot вл.}{кг \cdot вл.}$				
100	60					0,28	Уманский витаминный завод	78	
45	38	20,3	65,3	117	1396	0,3		—	
170	60	11,1	35,7	38,3	900	0,3	Белгородский витаминный комбинат	47	73
160	65	78,8	252	9,4	270	0,28	То же	105	
250	65	34,2	109,7	32,5		0,2	»	34	
							»	28	
90—160	50—80	37—73	40—79	30—50		0,25	Борисовская химико-фармацевтическая фабрика		
							Завод им. Карпова (г. Москва)		
							Завод «Акрихин» (п. Купавна)	74	
110		60					Бийский витаминный завод		

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d$, мм	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
СМК для мягкого гранулирования	5000 × 3500 × 5500, 500	50	Никотиновая кислота	Кристалло-коллоидная II	29,6	0,005
СМ-3 (опытный образец)	4300 × 3500 × 5500, 1100	75	Гидрат-ди-ацетон 2-кето-1-гулоновой кислоты	Кристаллическая	15	0,5
СМК для кристаллических материалов	5000 × 3500 × 5500, 500	100	МАК	Кристаллическая рассыпчатая	6,34	0,06
	5000 × 3500 × 5500, 500	50	Азорибитил-амин**	Кристаллическая	50	0,5
	5000 × 3500 × 5500, 500	50	Барбитуровая кислота	То же	30	0,2
	4340 × 3500 × 5500, 1100	300	Сорбоза	»	6	0,2
СМК пилотная установка	2500 × 1000 × 1500, 156	2—20	Пиперазин, Фтивазид	Кристалло-коллоидные	30—5	5—0,5
СМК серийная			Диклоксацилин, Левомитин			
СМК пилотная			Аминалон и др.			
			Жом облепихи	Маслянистопастообразная	57,8	4,9

Температура, °C		Напр по исп
теплоносителя	в слое материала	
100	60	
45	38	20,3
170	60	11,1
160	65	78,8
250	65	34,2
90—160	50—80	37—73
110		40

Температура, °С		Напряжение по испаренной влаге		Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено), тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушильной камеры, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	теплоносителя, $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$	тепла, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$				
100	60					0,28	Уманский витаминный завод	78	
45	38	20,3	65,3	117	1396	0,3		—	
170	60	11,1	35,7	38,3	900	0,3	Белгородский витаминный комбинат	47	73
160	65	78,8	252	9,4	270	0,28	То же	105	
250	65	34,2	109,7	32,5		0,2	»	34	
							»		
								28	
90—160	50—80	37—73	40—79	30—50		0,25	Борисовская химико-фармацевтическая фабрика Завод им. Карпова (г. Москва) Завод «Акрихин» (п. Купавна) Бийский витаминный завод	74	
110		60							

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d$, мм	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
Комбинированная сушилка СГК для пастообразных СМК пилотная установка		2	Са-соль хлортетрациклина	Пастообразная	75—80	5—8
		2	Белковый гидролизат с агаром Катализаторная масса НТК-4	Творогообразная	35	6,5

* h — высота, b — ширина, d — диаметр сушильной камеры.
 ** Расход теплоносителя должен определяться из соображения безо

Термодинамические параметры и коэффициенты

Материал, его характеристика, изотермы	d	T , К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1
Амидопирин (сорбция) сухой гранулят (амидопирин + 10%-ный крахмальный клейстер)		273	$u \cdot 10^2$ кг/кг	0,03
			$-\mu \cdot 10^{-5}$ Дж/моль	53,31
			$c'_m \cdot 10^9$ моль/Дж	0,20
			$-\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5}$ Дж/моль·К	0,118
			$\delta \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$	
			$q_d \cdot 10^{-6}$ Дж/моль	
Амидопирин (сорбция)		293	1	0,01
			2	57,2

Продолжение табл. 1

Температура, °С	Напряжение по испаренной в лаге	Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено), тыс. руб.	КПД, %
		теплоносителя, кг	в слое материала, кг·в.л.				
160	80—90	29,3	64,5	60,5	725	3	
110	80	47,4	50,8	58	800	0,28	

пасности работы.

Таблица 2

массопереноса химико-фармацевтических препаратов

Относительная влажность воздуха ϕ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,05	0,08	0,115	0,155	0,2	0,25	0,328	0,475	1,1	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	2,58	5,167	2,44	1,2	
0,20	0,12	0,345	1,10	1,69	1,86	3,82	11,47	86,25	
0,118	0,100	0,092	0,2	0,19	0,13	0,108	0,072	—	
0,0236	0,02	0,031	0,22	0,32	0,25	0,41	0,82	—	
69,47	55,6	46,326	70,65	63,7	45,69	34,65	22,096	—	
0,06	0,075	0,1	0,12	0,145	0,19	0,245	0,35	0,6	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	1,3	

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times d$, мм	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
Комбинированная сушилка СГК для пастообразных		2	Са-соль хлортетрациклина	Пастообразная	75—80	5—8
		2	Белковый гидролизат с агаром Катализаторная масса НТК-4	Творогообразная	35	6,5

* h — высота, b — ширина, d — диаметр сушильной камеры.
 ** Расход теплоносителя должен определяться из соображения безо

Термодинамические параметры и коэффициенты

Материал, его характеристика, изотермы	d	T , К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1
Амидопирин (сорбция) сухой гранулят (амидопирин + 10%-ный крахмальный клейстер)		273	$u \cdot 10^2$ кг/кг	0,03
			$-\mu \cdot 10^{-5}$ Дж/моль	53,31
			$c_m \cdot 10^9$ моль/Дж	0,20
			$-\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5}$ Дж/моль·К	0,118
			$\delta \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$	
			$q_d \cdot 10^{-6}$ Дж/моль	
Амидопирин (сорбция)		293	1	0,01
			2	57,2

Температура, °С	Напряжение по испаренной в лаге	Удельный расход	Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено) тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушиль-ной камеры, $\frac{кг}{м^3 \cdot ч}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{кг}{м^2 \cdot ч}$	теплоносителя, $\frac{кг}{кг \cdot вл.}$	тепла, $\frac{ккал}{кг \cdot вл.}$	
160	80—90	29,3	64,5	60,5	725	3
110	80	47,4	50,8	58	800	0,28

пасности работы.

Таблица 2

массопереноса химико-фармацевтических препаратов

Относительная влажность воздуха ϕ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,05	0,08	0,115	0,155	0,2	0,25	0,328	0,475	1,1	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	2,58	5,167	2,44	1,2	
0,20	0,12	0,345	1,10	1,69	1,86	3,82	11,47	86,25	
0,118	0,100	0,092	0,2	0,19	0,13	0,108	0,072	—	
0,0236	0,02	0,031	0,22	0,32	0,25	0,41	0,82	—	
69,47	55,6	46,326	70,65	63,7	45,69	34,65	22,096	—	
0,06	0,075	0,1	0,12	0,145	0,19	0,245	0,35	0,6	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	1,3	

Тип аппарата	Габаритные размеры, $h \times b \times l, d$, мм	Производительность, кг/ч	Препарат	Консистенция	Влагосодержание, %	
					W_H	W_K
Комбинированная сушилка СГК для пастообразных		2	Са-соль хлортетрациклина	Пастообразная	75—80	5—8
СМК пилотная установка		2	Белковый гидролизат с агаром Катализаторная масса НТК-4	Творогообразная	35	6,5

* h — высота, b — ширина, d — диаметр сушильной камеры.
 ** Расход теплоносителя должен определяться из соображения безо

Термодинамические параметры и коэффициенты

Материал, его характеристика, изотермы	d	T , К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Амидопирин (сорбция) сухой гранулят (амидопирин+10%-ный крахмальный клейстер)		273	$u \cdot 10^2$ кг/кг	0,03	
			$-\mu \cdot 10^{-5}$ Дж/моль	53,31	
			$c_m' \cdot 10^9$ моль/Дж	0,20	
			$-\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5}$ Дж/моль·К	0,118	
			$\delta \cdot 10^{-4}$ К $^{-1}$		
			$q_d \cdot 10^{-6}$ Дж/моль		
Амидопирин (сорбция)		293	1	0,01	
			2	57,2	

Продолжение табл. 1

Температура, °С		Напряжение по испаренной в лаге		Удельный расход		Потери, %	Место внедрения	Годовой экономический эффект (подтверждено), тыс. руб.	КПД, %
теплоносителя	в слое материала	на объем сушильной камеры, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3 \cdot \text{ч}}$	на зеркало кипящего слоя, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}$	тепло носителя, $\frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$	ккал тепла, $\frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{вл.}}$				
160	80—90	29,3	64,5	60,5	725	3		91,5	82
110	80	47,4	50,8	58	800	0,28			

пасности работы.

Таблица 2

массопереноса химико-фармацевтических препаратов

Относительная влажность воздуха ф									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,05	0,08	0,115	0,155	0,2	0,25	0,328	0,475	1,1	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	2,58	5,167	2,44	1,2	
0,20	0,12	0,345	1,10	1,69	1,86	3,82	11,47	86,25	
0,118	0,100	0,092	0,2	0,19	0,13	0,108	0,072	—	
0,0236	0,02	0,031	0,22	0,32	0,25	0,41	0,82	—	
69,47	55,6	46,326	70,65	63,7	45,69	34,65	22,096	—	
0,06	0,075	0,1	0,12	0,145	0,19	0,245	0,35	0,6	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	1,3	

Амидопирин (сорбция)

313

3
4
5
6

0,1
0,035
—
—

Амидопирин (десорбция)

273

1
2
3
4
5
6

0,05
59,15
0,035
—
—
—

Амидопирин (десорбция)

293

1
2
3
4
5
6

0,05
53,31
0,23
—
—
—

Амидопирин (десорбция)

313

1
2
3
4
5
6

0,05
57,2
0,23
—
—
—

Норсульфазол (сорбция),
норсульфазол + 5%-ный
крахмальный клейстер

273

1
2
3
4
5
6

0,115
53,31
0,0375
—
—
—

Норсульфазол (сорбция)

293

1
2
3
4
5
6

0,11
57,2
0,18
—
—
—

Норсульфазол (сорбция)

313

1
2
3

—
—
—

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
0,059	0,15	0,31	0,53	1,00	1,58	2,2	4,8	50
—	—	—	0,2	0,188	0,15	0,14	0,119	0,05
—	—	—	0,105	0,185	0,237	0,308	0,57	2,5
—	—	—	75,82	66,9	52,81	46,56	37,4	15,95
0,07	0,086	0,1	0,123	0,15	0,2	0,25	0,35	0,99
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3
0,055	0,20	0,32	0,54	1,16	1,94	2,85	4,80	6,21
—	—	—	0,2	—	0,91	0,137	0,119	—
—	—	—	0,108	—	0,37	0,39	0,57	—
—	—	—	80,41	—	68,94	48,616	39,94	—
0,07	0,09	0,14	0,16	0,22	0,28	0,41	0,9	—
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,23	0,23	0,78	1,06	1,34	1,6	4,3	25	—
—	—	0,08	0,06	0,05	0,131	0,172	—	—
—	—	0,062	0,063	0,067	0,209	0,739	—	—
—	—	42,8	32,2	25,35	44,12	52,4	—	—
0,06	0,09	0,14	0,16	0,21	0,25	0,29	0,36	0,65
39,98	29,91	22,77	17,2	12,69	8,763	5,446	2,619	1,3
0,23	0,23	0,78	1,06	1,33	—	1,83	2,5	29
—	—	0,08	0,06	0,05	0,04	0,125	0,175	—
—	—	0,06	0,063	0,0665	—	0,228	0,437	—
—	—	46,21	34,78	27,34	20,48	42,17	53,77	—
0,06	0,08	0,1	0,115	0,145	0,165	0,215	0,3	0,4
41,34	31,94	23,54	17,51	13,12	0,161	5,735	2,708	1,3
0,23	0,23	0,37	0,47	0,96	1,45	2,23	4	21,6
—	—	0,3	0,27	0,235	0,3	0,275	0,1	0,025
—	—	0,111	0,127	0,225	0,435	0,61	0,4	0,54
—	—	117,8	102,37	86,67	103,06	91,81	34	9,125
0,145	—	0,175	0,20	0,280	0,250	0,3	0,36	0,36
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,29	5,167	2,44	—
0,19	—	0,31	0,49	0,791	1,5	1,5	2,2	—
—	—	0,435	0,336	0,31	0,168	0,138	0,116	—
—	—	0,134	0,164	0,24	0,168	0,207	0,255	—
—	—	139,96	107,77	96,46	54,122	42,861	34,108	—
0,145	0,175	0,2	0,22	0,283	0,3	0,36	—	—
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,61	—
0,18	0,3	0,36	0,438	0,65	1,22	2,5	—	—
0,136	0,435	0,336	0,350	0,310	0,116	0,118	—	—
0,024	0,13	0,12	0,153	0,20	0,168	0,290	—	—
—	157,36	121,218	119,77	103,52	49,29	37,53	—	—
—	0,07	0,12	0,175	0,25	0,31	0,38	0,49	0,7
—	31,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3
—	—	0,714	0,95	1,77	2,07	2,9	7	15,86

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Амидопирин (сорбция)	313		3	0,035	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,05	
			2	59,15	
Амидопирин (десорбция)	273		3	0,035	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,05	
			2	53,31	
Амидопирин (десорбция)	293		3	0,23	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,05	
			2	57,2	
Амидопирин (десорбция)	313		3	0,23	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,05	
			2	59,15	
Норсульфазол (сорбция), норсульфазол + 5%-ный крахмальный клейстер	273		3	0,23	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,115	
			2	53,31	
Норсульфазол (сорбция)	293		3	0,0375	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,11	
			2	57,2	
Норсульфазол (сорбция)	313		3	0,18	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	—	
			2	—	
			3	—	

Относительная влажность воздуха φ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,059	0,15	0,31	0,53	1,00	1,58	2,2	4,8	50	
—	—	—	0,2	0,188	0,15	0,14	0,119	0,05	
—	—	—	0,105	0,185	0,237	0,308	0,57	2,5	
—	—	—	75,82	66,9	52,81	46,56	37,4	15,95	
0,07	0,086	0,1	0,123	0,15	0,2	0,25	0,35	0,99	
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3	
0,055	0,20	0,32	0,54	1,16	1,94	2,85	4,80	6,21	
—	—	—	0,2	—	0,91	0,137	0,119	—	
—	—	—	0,108	—	0,37	0,39	0,57	—	
—	—	—	80,41	—	68,94	48,616	39,94	—	
0,07	0,09	0,14	0,16	0,22	0,28	0,41	0,9	—	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2	
0,23	0,23	0,78	1,06	1,34	1,6	4,3	25	—	
—	—	0,08	0,06	0,05	0,131	0,172	—	—	
—	—	0,062	0,063	0,067	0,209	0,739	—	—	
—	—	42,8	32,2	25,35	44,12	52,4	—	—	
0,06	0,09	0,14	0,16	0,21	0,25	0,29	0,36	0,65	
39,98	29,91	22,77	17,2	12,69	8,763	5,446	2,619	1,3	
0,23	0,23	0,78	1,06	1,33	—	1,83	2,5	29	
—	—	0,08	0,06	0,05	0,04	0,125	0,175	—	
—	—	0,06	0,063	0,0665	—	0,228	0,437	—	
—	—	46,21	34,78	27,34	20,48	42,17	53,77	—	
0,06	0,08	0,1	0,115	0,145	0,165	0,215	0,3	0,4	
41,34	31,94	23,54	17,51	13,12	0,161	5,735	2,708	1,3	
0,23	0,23	0,37	0,47	0,96	1,45	2,23	4	21,6	
—	—	0,3	0,27	0,235	0,3	0,275	0,1	0,025	
—	—	0,111	0,127	0,225	0,435	0,61	0,4	0,54	
—	—	117,8	102,37	86,67	103,06	91,81	34	9,125	
0,145	—	0,175	0,20	0,280	0,250	0,3	0,36	0,36	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,29	5,167	2,44	—	
0,19	—	0,31	0,49	0,791	1,5	1,5	2,2	—	
—	—	0,435	0,336	0,31	0,168	0,138	0,116	—	
—	—	0,134	0,164	0,24	0,168	0,207	0,255	—	
—	—	139,96	107,77	96,46	54,122	42,861	34,108	—	
0,145	0,175	0,2	0,22	0,283	0,3	0,36	—	—	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,61	—	
0,18	0,3	0,36	0,438	0,65	1,22	2,5	—	—	
0,136	0,435	0,336	0,350	0,310	0,116	0,118	—	—	
0,024	0,13	0,12	0,153	0,20	0,168	0,290	—	—	
—	157,36	121,218	119,77	103,52	49,29	37,53	—	—	
—	0,07	0,12	0,175	0,25	0,31	0,38	0,49	0,7	
—	31,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3	
—	—	0,714	0,95	1,77	2,07	2,9	7	15,86	

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1	
				0,1	
Норсульфазол (десорбция)	273		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,1	
			2	53,31	
			3	0,16	
Норсульфазол (десорбция)	293		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,09	
			2	57,2	
			3	0,16	
Норсульфазол (десорбция)	313		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,05	
			2	59,15	
			3	0,17	
Фтивазид (сорбция)	273		4	—	
			5	—	
			6	—	
Фтивазид (сорбция)	293		1	0,1	
			2	53,31	
			3	0,325	
Фтивазид (сорбция)	313		1	0,1	
			2	59,15	
			3	0,325	
Фтивазид (десорбция)	273		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	5,1	
			2	52,3	
			3	—	
Фтивазид (десорбция)	293		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	5,2	
			2	57,2	
			3	0,4	
Фтивазид (десорбция)	293		4	0,67	
			5	0,268	
			6	252,4	

Относительная влажность воздуха φ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
—	—	1,20	0,550	—	0,115	0,075	—	—	
—	—	0,86	0,52	—	0,23	0,217	—	—	
—	—	401,16	190,25	—	45,29	29,27	—	—	
0,125	0,145	0,16	0,17	0,19	0,22	0,26	0,33	0,4	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2	
0,16	0,16	0,45	0,57	0,74	1,2	1,45	3,28	5,8	
—	—	—	0,175	—	—	0,075	0,06	—	
—	—	—	0,099	—	—	0,108	0,197	—	
—	—	—	36,32	—	—	25,72	18,9	—	
0,115	0,13	0,145	0,16	0,175	0,225	0,29	0,45	0,85	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,546	2,619	1,3	
0,16	0,16	0,25	0,57	0,82	1,72	2,5	1,4	—	
0,12	0,52	0,45	—	0,1	0,1	0,05	0,025	0,005	
—	0,195	0,08	0,05	—	0,082	0,09	0,115	0,355	
396,6	175,9	80,9	—	41,8	23,35	18,58	9,82	—	
0,05	0,07	0,11	0,14	0,185	0,25	0,32	0,47	0,75	
41,34	31,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3	
0,17	0,37	0,61	0,83	1,172	1,8	3,16	10,7	23,6	
—	—	0,9	0,2	0,1	0,085	0,075	—	—	
—	—	0,549	0,166	0,117	0,153	0,237	—	—	
0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	2,1	6,8	
37,26	27,81	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2	
0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685	
0,15	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,7	2,0	6,0	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,161	2,44	1,3	
0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685	
0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,4	0,65	2,7	7	
41,34	30,94	23,54	17,86	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3	
0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685	
5,35	5,41	5,41	5,47	5,5	5,5	5,53	5,82	6,76	
36,6	27,3	20,8	15,7	11,6	8,1	5,1	2,4	1,2	
1,00	1,00	1,00	1,00	9,45	16,54	1,31	—	—	
0,83	0,57	0,57	0,372	0,161	0,161	—	—	—	
0,83	0,57	0,57	0,372	1,52	1,52	—	—	—	
264,55	183,48	176,82	117,6	55,05	52,05	—	—	—	
5,28	5,3	5,35	5,4	5,44	5,5	5,6	5,77	6	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3	
0,47	0,65	0,7	0,93	0,94	1,58	3,03	6,07	17,69	
—	0,5	0,5	0,5	0,42	0,22	—	—	—	
—	0,325	0,35	0,465	0,39	0,397	—	—	—	
—	175,9	168,9	163,4	135,56	73,16	—	—	—	

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1	
				0,1	
Норсульфазол (десорбция)	273		4	—	
			5	—	
			6	—	
			1	0,1	
			2	53,31	
			3	0,16	
			4	—	
Норсульфазол (десорбция)	293		5	—	
			6	—	
			1	0,09	
			2	57,2	
			3	0,16	
			4	—	
			5	—	
Норсульфазол (десорбция)	313		6	—	
			1	0,05	
			2	59,15	
			3	0,17	
			4	—	
			5	—	
Фтивазид (сорбция)	273		1	0,1	
			2	53,31	
			3	0,325	
Фтивазид (сорбция)	293		1	0,1	
			2	57,2	
			3	0,325	
Фтивазид (сорбция)	313		1	0,1	
			2	59,15	
			3	0,325	
Фтивазид (десорбция)	273		1	5,1	
			2	52,3	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Фтивазид (десорбция)	293		1	5,2	
			2	57,2	
			3	0,4	
			4	0,67	
			5	0,268	
			6	252,4	

Относительная влажность воздуха φ

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
—	—	—	1,20	0,550	—	0,115	0,075	—	—
—	—	—	0,86	0,52	—	0,23	0,217	—	—
—	—	—	401,16	190,25	—	45,29	29,27	—	—
0,1	0,125	0,145	0,16	0,17	0,19	0,22	0,26	0,33	0,4
53,31	37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,16	0,16	0,16	0,45	0,57	0,74	1,2	1,45	3,28	5,8
—	—	—	—	0,175	—	—	0,075	0,06	—
—	—	—	—	0,099	—	—	0,108	0,197	—
—	—	—	—	36,32	—	—	25,72	18,9	—
0,09	0,115	0,13	0,145	0,16	0,175	0,225	0,29	0,45	0,85
57,2	39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,546	2,619	1,3
0,16	0,16	0,16	0,25	0,57	0,82	1,72	2,5	1,4	—
—	0,12	0,52	0,45	—	0,1	0,1	0,05	0,025	0,005
—	—	0,195	0,08	0,05	—	0,082	0,09	0,115	0,355
—	396,6	175,9	80,9	—	41,8	23,35	18,58	9,82	—
0,05	0,05	0,07	0,11	0,14	0,185	0,25	0,32	0,47	0,75
59,15	41,34	31,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3
0,17	0,17	0,37	0,61	0,83	1,172	1,8	3,16	10,7	23,6
—	—	—	0,9	0,2	0,1	0,085	0,075	—	—
—	—	—	0,549	0,166	0,117	0,153	0,237	—	—
0,1	0,2	0,25	0,3	0,4	0,5	0,55	0,6	2,1	6,8
53,31	37,26	27,81	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,325	0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685
0,1	0,15	0,25	0,3	0,35	0,40	0,45	0,7	2,0	6,0
57,2	37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,161	2,44	1,3
0,325	0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685
0,1	0,15	0,20	0,25	0,3	0,35	0,4	0,65	2,7	7
59,15	41,34	30,94	23,54	17,86	13,12	9,165	5,735	2,708	1,3
0,325	0,325	0,325	1,66	4,3	9,3	9,3	31	61	685
0,1	5,35	5,41	5,41	5,47	5,5	5,5	5,53	5,82	6,76
53,31	36,6	27,3	20,8	15,7	11,6	8,1	5,1	2,4	1,2
0,325	1,00	1,00	1,00	1,00	9,45	16,54	1,31	—	—
0,1	0,83	0,57	0,57	0,372	0,161	0,161	—	—	—
57,2	0,83	0,57	0,57	0,372	1,52	1,52	—	—	—
0,325	264,55	183,48	176,82	117,6	55,05	52,05	—	—	—
0,1	5,28	5,3	5,35	5,4	5,44	5,5	5,6	5,77	6
59,15	37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3
0,325	0,47	0,65	0,7	0,93	0,94	1,58	3,03	6,07	17,69
0,1	—	0,5	0,5	0,5	0,42	0,22	—	—	—
57,2	—	0,325	0,35	0,465	0,39	0,397	—	—	—
0,4	—	175,9	168,9	163,4	135,56	73,16	—	—	—
0,67	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0,268	—	—	—	—	—	—	—	—	—
252,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, K	Обозначение параметра и его размерность*	0,1
тивазид (десорбция)		313	1 2 3 4 5 6	5,18 59,15
Мак (гранулят) (сорбция)		273	1 2 3 4 5 6	0 — — — —
Медицинская аскорбиновая кислота (гранулы) (сорбция)		293	1 2 3 6	0 — — —
Медицинская аскорбиновая кислота (сорбция)		313	1 2 3	0 — —
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		273	1 2 3	0,114 53,31 0,0144
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		293	1 2 3	0,112 — 0,0144
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		313	1 2 3	0,1 59,15 0,0144
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		273	1 2 3	2,3 53,1 —
Пиранал (сорбция)		293	1 2 3	2,3 57,20 —
Пиранал (сорбция) Амидопириин + аналгин + + крахмальный клейстер		313	1 2 3	2 59,15 —

Средняя влажность воздуха φ								
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
5,2 41,34 0,12 0,71 0,085 264,13	5,24 31,44 0,814 0,68 0,55 244,24	5,29 23,54 0,80 0,45 0,36 164,75	5,32 17,81 0,88 0,45 0,37 158,95	5,38 13,12 1,26 0,325 0,41 115,02	5,44 9,165 1,60 0,255 0,36 79,72	5,53 2,735 2,75	5,76 2,708 7,41	5,9 1,3 14
0,01 37,16 0,09 — — —	— 27,97 0,09 — — —	0,037 21,21 0,09 — — —	0,074 16,05 0,92 — — —	0,1 11,83 1,32 — — —	0,132 8,258 14,6 — — —	0,18 5,167 3,4 — — —	0,453 2,44 23,55 — — —	1,2 1,2 8,6 — — —
0,018 37,26 0,09 37,26 0,0125 41,34 0,09	0,024 27,87 0,09 27,81 0,03 30,94 0,09	0,042 21,21 0,09 21,21 0,057 23,54 0,09	0,064 16,05 0,53 16,95 0,0912 17,81 1,18	0,08 11,83 0,92 17,83 0,096 13,12 1,20	0,121 8,258 1,32 8,258 0,112 9,165 1,41	0,17 5,167 3,33 5,167 0,34 5,735 8,92	0,307 2,44 7,14 2,614 0,54 2,708 21,1	0,79 1,3 39 1,3 — — —
0,15 37,96 0,0144 0,105 37,26 0,0144	0,183 27,87 0,0144 0,1 27,87 0,0144	0,23 21,21 2,35 0,12 21,21 0,0144	0,2 16,05 2,35 0,12 16,05 0,0144	0,22 11,83 2,35 0,2 11,83 0,0144	0,2 8,258 2,35 0,2 8,258 2,35	0,3 5,167 3,42 0,34 5,167 4,36	0,4 2,44 7,5 0,4 2,44 7,50	2,62 1,2 33,3 2,92 1,3 33,3
0,1 41,34 0,0144 2,5 37,96 —	0,126 31,94 0,0144 2,5 27,87 4,36	0,137 23,54 0,0144 2,5 16,03 4,36	0,166 17,21 0,0144 2,5 11,83 4,36	0,2 13,12 0,0144 2,55 8,258 4,36	0,2 9,165 0,0144 2,55 5,167 4,36	0,295 5,735 3,53 2,7 2,44 —	0,58 2,708 25 4 1,2 —	4,5 — — — — —
2,3 37,26 —	2,35 27,87 —	2,4 21,21 —	2,4 16,05 —	2,5 11,83 4,36	2,5 8,258 4,36	2,6 5,467 8,04	5 2,44 —	— — —
2,45 41,34 0,83	2,4 31,94 0,83	2,4 23,54 0,83	2,4 17,81 0,83	2,5 13,12 2,95	2,55 9,165 2,95	2,6 5,735 21	4 2,708 —	— — —
1,6 37,96 —	1,55 27,37 —	1,4 16,05 —	1,3 11,83 —	1,25 8,258 —	1,3 5,167 —	1,5 2,44 —	2,5 1,2 —	— — —

Фтывазид (десорбция)

313

1	5,18
2	59,15
3	
4	
5	
6	

Мак (гранулят) (сорбция)

273

1	0
2	—
3	—
4	—
5	—
6	—

Медицинская аскорбиновая
кислота (гранулы) (сорбция)

293

1	0
2	—
3	—
6	—

Медицинская аскорбиновая
кислота (сорбция)

313

1	0
2	—
3	—

Медицинская аскорбиновая
кислота (десорбция)

273

1	0,114
2	53,31
3	0,0144

Медицинская аскорбиновая
кислота (десорбция)

293

1	0,112
2	—
3	0,0144

Медицинская аскорбиновая
кислота (десорбция)

313

1	0,1
2	59,15
3	0,0144

Пиранал (сорбция)

273

1	2,3
2	53,1
3	—

Пиранал (сорбция)
Амидопирин+анальгин+
+крахмальный клейстер

293

1	2,3
2	57,20
3	—

Пиранал (сорбция)

313

1	2
2	59,15
3	—

Пиранал (десорбция)

273

1	1,7
2	53,31
—	—
—	—

5,2	5,24	5,29	5,32	5,38	5,44	5,53	5,76	5,9
41,34	31,44	23,54	17,81	13,12	9,165	2,735	2,708	1,3
0,12	0,814	0,80	0,88	1,26	1,60	2,75	7,41	14
0,71	0,68	0,45	0,45	0,325	0,255			
0,085	0,55	0,36	0,37	0,41	0,36			
264,13	244,24	164,75	158,95	115,02	79,72			
0,01	—	0,037	0,074	0,1	0,132	0,18	0,453	1,2
37,16	27,97	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,09	0,09	0,09	0,92	1,32	14,6	3,4	23,55	8,6
—	—	—	—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—	—	—	—
37,16	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,018	0,024	0,042	0,064	0,08	0,121	0,17	0,307	0,79
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3
0,09	0,09	0,09	0,53	0,92	1,32	3,33	7,14	39
37,26	27,81	21,21	16,95	17,83	8,258	5,167	2,614	1,3
0,0125	0,03	0,057	0,0912	0,096	0,112	0,34	0,54	—
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	—
0,09	0,09	0,09	1,18	1,20	1,41	8,92	21,1	—
0,15	0,183	0,23	0,2	0,22	0,2	0,3	0,4	2,62
37,96	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2
0,0144	0,0144	2,35	2,35	2,35	2,35	3,42	7,5	33,3
0,105	0,1	0,12	0,12	0,2	0,23	0,34	0,4	2,92
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3
0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	2,35	4,36	7,50	33,3
0,1	0,126	0,137	0,166	0,2	0,2	0,295	0,58	4,5
41,34	31,94	23,54	17,21	13,12	9,165	5,735	2,708	
0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	0,0144	3,53	25	
2,5	2,5	2,5	2,5	2,55	2,55	2,7	4	
37,96	27,87	16,03	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2	
—	4,36	4,36	4,36	4,36	4,36			
2,3	2,35	2,4	2,4	2,5	2,5	2,6	5	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,467	2,44	
—	—	—	—	4,36	4,36	8,04		
2,45	2,4	2,4	2,4	2,5	2,55	2,6	4	
41,34	31,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,708	
0,83	0,83	0,83	0,83	2,95	2,95	21		
1,6	1,55	1,4	1,3	1,25	1,3	1,5	2,5	
37,96	27,37	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2	
—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	

13*

195

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Фтивазид (десорбция)		313	1	5,18	
			2	59,15	
			3		
			4		
			5		
			6		
Мак (гранулят) (сорбция)		273	1	0	
			2	—	
			3		
			4	—	
			5	—	
			6		
Медицинская аскорбиновая кислота (гранулы) (сорбция)		293	1	0	
			2	—	
			3		
			6		
Медицинская аскорбиновая кислота (сорбция)		313	1	0	
			2		
			3		
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		273	1	0,114	
			2	53,31	
			3	0,0144	
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		293	1	0,112	
			2	—	
			3	0,0144	
Медицинская аскорбиновая кислота (десорбция)		313	1	0,1	
			2	59,15	
			3	0,0144	
Пиранал (сорбция)		273	1	2,3	
			2	53,1	
			3	—	
Пиранал (сорбция) Амидопирин+анальгин+ +крахмальный клейстер		293	1	2,3	
			2	57,20	
			3	—	
Пиранал (сорбция)		313	1	2	
			2	59,15	
			3		
Пиранал (десорбция)		273	1	1,7	
			2	53,31	
				—	
				—	

Средняя		0,2	0,3
5,2	5,24		
41,34	31,44		
0,12	0,814		
0,71	0,68		
0,085	0,55		
264,13	244,24		
0,01	—		
37,16	27,97		
0,09	0,09		
—	—		
—	—		
37,16	27,87		
0,018	0,024		
37,26	27,87		
0,09	0,09		
37,26	27,81		
0,0125	0,03		
41,34	30,94		
0,09	0,09		
0,15	0,183		
37,96	27,87		
0,0144	0,0144		
0,105	0,1		
37,26	27,87		
0,0144	0,0144		
0,1	0,126		
41,34	31,94		
0,0144	0,0144		
2,5	2,5		
37,96	27,87		
—	4,36		
2,3	2,35		
37,26	27,87		
—	—		
2,45	—		
41,34	2,4		
0,83	31,94		
1,6	0,83		
37,96	1,55		
—	27,37		
—	—		

Статистическая влажность воздуха ф

0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
5,18 59,15	5,2 41,34 0,12 0,71 0,085 264,13	5,24 31,44 0,814 0,68 0,55 244,24	5,29 23,54 0,80 0,45 0,36 164,75	5,32 17,81 0,88 0,45 0,37 158,95	5,38 13,12 1,26 0,325 0,41 115,02	5,44 9,165 1,60 0,255 0,36 79,72	5,53 2,735 2,75	5,76 2,708 7,41	5,9 1,3 14
0	0,01 37,16 0,09 — — 37,16	— 27,97 0,09 — — 27,87	0,037 21,21 0,09 — — 21,21	0,074 16,05 0,92 — — 16,05	0,1 11,83 1,32 — — 11,83	0,132 8,258 14,6 — — 8,258	0,18 5,167 3,4 — — 5,167	0,453 2,44 23,55 — — 2,44	1,2 1,2 8,6 — — 1,2
0	0,018 37,26 0,09 37,26	0,024 27,87 0,09 27,81	0,042 21,21 0,09 21,21	0,064 16,05 0,53 16,95	0,08 11,83 0,92 17,83	0,121 8,258 1,32 8,258	0,17 5,167 3,33 5,167	0,307 2,44 7,14 2,614	0,79 1,3 39 1,3
0	0,0125 41,34 0,09	0,03 30,94 0,09	0,057 23,54 0,09	0,0912 17,81 1,18	0,096 13,12 1,20	0,112 9,165 1,41	0,34 5,735 8,92	0,54 2,708 21,1	— — —
0,114 53,31 0,0144	0,15 37,96 0,0144	0,183 27,87 0,0144	0,23 21,21 2,35	0,2 16,05 2,35	0,22 11,83 2,35	0,2 8,258 2,35	0,3 5,167 3,42	0,4 2,44 7,5	2,62 1,2 33,3
0,112 — 0,0144	0,105 37,26 0,0144	0,1 27,87 0,0144	0,12 21,21 0,0144	0,12 16,05 0,0144	0,2 11,83 0,0144	0,23 8,258 2,35	0,34 5,167 4,36	0,4 2,44 7,50	2,92 1,3 33,3
0,1 59,15 0,0144	0,1 41,34 0,0144	0,126 31,94 0,0144	0,137 23,54 0,0144	0,166 17,21 0,0144	0,2 13,12 0,0144	0,2 9,165 0,0144	0,295 5,735 3,53	0,58 2,708 25	4,5
2,3 53,1 —	2,5 37,96 —	2,5 27,87 4,36	2,5 16,03 4,36	2,5 11,83 4,36	2,55 8,258 4,36	2,55 5,167 4,36	2,7 2,44	4 1,2	
2,3 57,20 —	2,3 37,26 —	2,35 27,87 —	2,4 21,21 —	2,4 16,05 —	2,5 11,83 4,36	2,5 8,258 4,36	2,6 5,467 8,04	5 2,44	
2 59,15 —	2,45 41,34 0,83	2,4 31,94 0,83	2,4 23,54 0,83	2,4 17,81 0,83	2,5 13,12 2,95	2,55 9,165 2,95	2,6 5,735 21	4 2,708	
1,7 53,31 —	1,6 37,96 —	1,55 27,37 —	1,4 16,05 —	1,3 11,83 —	1,25 8,258 —	1,3 5,167 —	1,5 2,44 —	2,5 1,2 —	

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1	
				0,1	
Пиранал (десорбция)		293	1	1,8	
			2	57,2	
			3	—	
			4	—	
Пиранал (десорбция)	313	313	1	1,8	
			2	59,15	
			3	—	
Тройчатка (сорбция)		273	1	0,05	
			2	53,31	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (сорбция)		293	1	0,05	
			2	57,2	
			3	0,39	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (сорбция)		313	1	0,05	
			2	59,15	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		275	1	0,1	
			2	53,31	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		293	1	0,15	
			2	57,2	
			3	0,7	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		313	1	0,05	
			2	59,15	

Относительная влажность воздуха ф									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
1,7	1,5	1,4	1,2	1,5	1,2	1,45	2		
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
—	—	—	—	—	—	—	—		
—	—	—	—	—	—	—	—		
1,7	1,6	1,5	1,4	1,35	1,6	2			
41,34	31,94	23,54	17,81	18,12	9,165	5,735	2,708		
—	—	—	—	—	—	—	—		
0,05	0,1	0,1	0,15	0,25	0,8	2			
37,96	27,37	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44			
—	0,367	0,367	0,367	0,36	—	44,3			
—	0,66	—	0,48	0,36	0,28	—			
—	0,792	—	0,576	0,29	—	—			
—	20,88	—	143,6	107,1	—	—			
0,1	0,115	0,21	0,2	0,4	1,1	4			
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
0,39	0,39	0,39	0,39	0,33	18,4	83			
0,765	0,765	—	0,416	0,33	—	—			
0,23	0,24	—	0,162	126	—	—			
263,34	253,54	—	137,9	108,52	—	—			
0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,9	5,735			
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	44			
—	—	0,367	0,367	2,18	23,47	—			
—	—	0,765	0,765	0,416	0,1	—			
—	—	0,28	0,28	0,9	2,34	—			
—	—	263,34	257,54	143,32	40,6	—			
0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,6	2			
37,96	27,87	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44			
1,53	—	—	—	—	6,66	131			
0,5	—	—	—	—	0,44	0,27			
0,765	—	—	—	—	2,93	35,37			
174,1	—	—	—	—	126,1	76,65			
0,3	0,4	0,45	0,4	0,4	1,15	4			
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
1,16	1,66	2,48	—	—	17,2	—			
0,25	0,225	—	—	—	0,1	—			
0,29	0,37	—	—	—	1,72	—			
112,45	95,32	—	—	—	38	—			
0,15	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	2			
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735			
—	1,53	—	1,84	3,5	4,3	—			
—	0,25	—	0,2	0,2	0,225	—			
—	—	—	0,368	0,7	0,967	—			

Пиранал (десорбция)	293	1	1,8
		2	57,2
Пиранал (десорбция)	313	3	—
	313	4	—
Тройчатка (сорбция)	273	1	1,8
		2	59,15
		3	—
		4	—
Тройчатка (сорбция)	293	1	0,05
		2	53,31
		3	—
		4	—
		5	—
		6	—
		1	0,05
		2	57,2
		3	0,39
		4	—
		5	—
		6	—
Тройчатка (сорбция)	313	1	0,05
		2	59,15
		3	—
		4	—
		5	—
		6	—
Тройчатка (десорбция)	275	1	0,1
		2	53,31
		3	—
		4	—
		5	—
		6	—
Тройчатка (десорбция)	293	1	0,15
		2	57,2
		3	0,7
		4	—
		5	—
		6	—
Тройчатка (десорбция)	313	1	0,05
		2	59,15
		3	—
		4	—
		5	—
		6	—

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
1,7	1,5	1,4	1,2	1,5	1,2	1,45	2	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	
—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	
1,7	1,6	1,5	1,4	1,35	1,6	2		
41,34	31,94	23,54	17,81	18,12	9,165	5,735	2,708	
—	—	—	—	—	—	—	—	
0,05	0,1	0,1	0,15	0,25	0,8	2		
37,96	27,37	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
—	0,367	0,367	0,367	6,56	—	44,3		
—	0,66	—	0,48	0,36	0,28	—		
—	0,792	—	0,576	0,29	—	—		
—	20,88	—	143,6	107,1	—	—		
0,1	0,115	0,21	0,2	0,4	1,1	4		
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	
0,39	0,39	0,39	0,39	3,24	18,4	83		
0,765	0,765	—	0,416	0,33	—	—		
0,23	0,24	—	0,162	126	—	—		
263,34	253,54	—	137,9	108,52	—	—		
0,05	0,05	0,1	0,1	0,2	0,9	—		
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735		
—	—	0,367	0,367	2,18	23,47	44		
—	—	0,765	0,765	0,416	0,1	—		
—	—	0,28	0,28	0,9	2,34	—		
—	—	263,34	257,54	143,32	40,6	—		
0,2	0,4	0,4	0,4	0,3	0,6	2		
37,96	27,87	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
1,53	—	—	—	—	6,66	131		
0,5	—	—	—	—	0,44	0,27		
0,765	—	—	—	—	2,93	35,37		
174,1	—	—	—	—	126,1	76,65		
0,3	0,4	0,45	0,4	0,4	1,15	4		
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3
1,16	1,66	2,48	—	—	17,2	—		
0,25	0,225	—	—	—	0,1	—		
0,29	0,37	—	—	—	1,72	—		
112,45	95,32	—	—	—	38	—		
0,15	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	2		
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735		
1	1,53	—	1,84	3,5	4,3	—		
0,7	0,25	—	0,2	0,2	0,225	—		
0,7	0,38	—	0,368	0,7	0,967	—		
261	109,65	—	80,7	75,7	79,72	—		

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Пиранал (десорбция)		293	1	1,8	
			2	57,2	
			3	—	
			4	—	
Пиранал (десорбция)	313	313	1	1,8	
			2	59,15	
			3	—	
Тройчатка (сорбция)		273	1	0,05	
			2	53,31	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (сорбция)		293	1	0,05	
			2	57,2	
			3	0,39	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (сорбция)		313	1	0,05	
			2	59,15	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		275	1	0,1	
			2	53,31	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		293	1	0,15	
			2	57,2	
			3	0,7	
			4	—	
			5	—	
			6	—	
Тройчатка (десорбция)		313	1	0,05	
			2	59,15	
			3	—	
			4	—	
			5	—	
			6	—	

Относительная		0,3
0,2		
1,7	1,5	
37,26	27,87	
—	—	
—	—	
1,7	1,6	
41,34	31,94	
—	—	
0,05	0,1	
37,96	27,37	
—	0,367	
—	0,66	
—	0,792	
—	20,88	
0,1	0,115	
37,26	27,87	
0,39	0,39	
0,765	0,765	
0,23	0,24	
263,34	253,54	
0,05	0,05	
41,34	30,94	
—	—	
—	—	
—	—	
—	—	
0,2	0,4	
37,96	27,87	
1,53	—	
0,5	—	
0,765	—	
174,1	—	
0,3	0,4	
37,26	27,87	
1,16	1,66	
0,25	0,225	
0,29	0,37	
112,45	95,32	
0,15	0,3	
41,34	30,94	
1	1,53	
0,7	0,25	
0,7	0,38	
261	109,65	

Относительная влажность воздуха φ

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
1,7 37,26 — —	1,5 27,87 — —	1,4 21,21 — —	1,2 16,05 — —	1,5 11,83 — —	1,2 8,258 — —	1,45 5,167 — —	2 2,44 — —	
1,7 41,34 —	1,6 31,94 —	1,5 23,54 —	1,4 17,81 —	1,35 18,12 —	1,6 9,165 —	2 5,735 —	2,708 —	
0,05 37,96 — —	0,1 27,37 0,367 0,66 0,792 20,88	0,1 16,05 0,367 — —	0,15 11,83 0,367 0,48 0,576 143,6	0,25 8,258 6,56 0,36 0,29 107,1	0,8 5,167 — 0,28 —	2 2,44 44,3 —		
0,1 37,26 0,39 0,765 0,23 263,34	0,115 27,87 0,39 0,765 0,24 253,54	0,21 21,21 0,39 — —	0,2 16,05 0,39 0,416 0,162 137,9	0,4 11,83 3,24 0,33 126 108,52	1,1 8,258 18,4	4 5,167 83	2,44	
0,05 41,34 — — —	0,05 30,94 — — —	0,1 23,54 0,367 0,765 0,28 263,34	0,1 17,81 0,367 0,765 0,28 257,54	0,2 13,12 2,18 0,416 0,9 143,32	0,9 9,165 23,47 0,1 2,34 40,6	5,735 44		
0,2 37,96 1,53 0,5 0,765 174,1	0,4 27,87 — — —	0,4 16,05 — — —	0,4 11,83 — — —	0,3 8,258 — — —	0,6 5,167 6,66 0,44 2,93 126,1	2 2,44 131 0,27 35,37 76,65		
0,3 37,26 1,16 0,25 0,29 112,45	0,4 27,87 1,66 0,225 0,37 95,32	0,45 21,21 2,48 — — —	0,4 16,05 — — —	0,4 11,83 — — —	1,15 8,258 17,2 0,1 1,72 38	4 5,167	2,44	1,3
0,15 41,34 1 0,7 0,7 261	0,3 30,94 1,53 0,25 0,38 109,65	0,4 23,54 — — —	0,45 17,81 1,84 0,2 0,368 80,7	0,5 13,12 3,5 0,2 0,7 75,7	0,55 9,165 4,3 0,225 0,967 79,72	2 5,735		

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, K	Обозначение параметра и его размерность*	0,1
Пирамеин (сорбция)		275	1	0,025
			2	53,31
			3	0,125
Пирамеин (сорбция)		293	1	0,025
			2	57,2
			3	0,125
		313	1	0,02
			2	59,15
			3	0,125
Пирамеин (сорбция)		273	1	0,03
			2	53,31
			3	0,125
			4	
			5	
			6	
Пирамеин (десорбция)		293	1	0,025
			2	57,2
			3	0,33
			4	0,04
Пирамеин (десорбция)		313	1	0,05
			2	59,82
			3	0,5
			4	0,3
			5	0,15
			6	153,72
		192	1	0
		293	2	57,2
			3	
Амидопирин 1-фенил, 2, 3-диметил-4-диметил-аминопиразолон-5 (порошок). Пластинчатые кристаллы белого цвета, параллелепипеды, квадратики, брусочки		109	1	
			2	
			3	
Норсульфазол (порошок). Пластинки неправильной формы, ромбики, иногда игольчатые		275	1	3,5
Цвет белый		293	1	3,59
				Рас

Относительная влажность воздуха φ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,05	0,09	0,100	0,125	0,18	0,22	0,25	0,4	0,83	
37,96	27,87	20,8	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3	
0,125	0,125	0,125	0,78	1,08	1,08	2,66	6,5	11	
0,05	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25	0,405	0,82	
37,26	27,84	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	11	
0,125	0,125	0,125	0,78	1,33	1,33	2,66	6,5		
0,05	0,08	0,18	0,15	0,18	0,21	0,25	0,405		
41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,7		
0,125	0,125	1,33	1,33	1,33	1,5	2,66	6,5		
0,2	0,41	0,6	0,65	0,7	0,79	0,8	0,9	1,3	
37,96	27,87	21,81	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05			
0,166	0,066	0,166	0,166	0,166					
0,33	0,33	0,33	0,33	0,33					
82,25	72,95	66,45	61,35	57,25					
0,1	0,3	0,5	0,6	0,65	0,65	0,7	0,85	1,2	
37,26	27,84	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,617		
0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166		
0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		
0,05	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,85	1,2	
41,9	31,4	23,9	18,1	13,3	9,3	5,8	2,7	1,3	
0,5	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	3,3	20,7		
0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3			
0,15	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63			
135,8	125,3	117,8	112	107,2	103,2	99,7	96,6	95,2	
0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04		
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,546	2,61	1,25	
	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,5		
		0,01	0,01	0,015	0,02	0,04	0,06		
		22,77	17,22	12,69	8,69	5,546	2,61		
		0,125	0,125	0,125	0,31	0,31	1		
		4,1	4,2	6,5	8,75	1,3	16,2		
3,6	3,38								
1,29									
	Увеличение веса								
	Плавнение								
плав-ся									
	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	1	4
							0,5	6	9
							0,5	10	13

Пирамеин (сорбция)	293	3	53,31	0,03	37,96	27,87	20,8	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,3
		1	0,125	0,125	0,125	0,125	0,78	1,08	1,08	2,66	6,5	11	
		2	0,025	0,05	0,05	0,07	0,1	0,15	0,2	0,25	0,405	0,82	
Пирамеин (сорбция)	313	3	57,2	37,26	27,84	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	11	
		1	0,125	0,125	0,125	0,125	0,78	1,33	1,33	2,66	6,5		
		2	0,02	0,05	0,08	0,18	0,15	0,18	0,21	0,25	0,405		
Пирамеин (сорбция)	273	3	59,15	41,34	30,94	23,54	17,81	13,12	9,165	5,735	2,7		
		1	0,125	0,125	0,125	1,33	1,33	1,33	1,5	2,66	6,5		
		2	0,03	0,2	0,41	0,6	0,65	0,7	0,79	0,8	0,9	1,3	
Пирамеин (десорбция)	293	3	53,31	37,96	27,87	21,81	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44		
		4	0,125	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05	2,05		
		5		0,166	0,066	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166		
Пирамеин (десорбция)	313	6		0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33		
		1	0,025	0,1	0,3	0,5	0,6	0,65	0,65	0,7	0,85	1,2	
		2	57,2	37,26	27,84	21,21	16,05	11,83	8,258	5,167	2,617		
Пирамеин (десорбция)	273	3	0,33	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166	0,166		
		4	0,04	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02		
		5		0,05	0,1	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,85	1,2	
Амидопирин 1-фенил, 2, 3-диметил-4-диметил-аминопиразолон-5 (порошок). Пластинчатые кристаллы белого цвета, параллелепипеды, квадратики, брусочки	192	2	59,82	41,9	31,4	23,9	18,1	13,3	9,3	5,8	2,7	1,3	
		3	0,5	0,5	2,1	2,1	2,1	2,1	2,1	3,3	20,7		
		4	0,3	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3		
Норсульфазол (порошок). Пластинки неправильной формы, ромбики, иногда игольчатые	109	5	0,15	0,15	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63		
		6	153,72	135,8	125,3	117,8	112	107,2	103,2	99,7	96,6	95,2	
		1	0	0	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	1,25	
Цвет белый	275	2	57,2	39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,546	2,61		
		3			0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,288	0,5		
Гидрат	293					0,01	0,01	0,015	0,02	0,04	0,06		
		1				22,77	17,22	12,69	8,69	5,546	2,61		
		2				0,125	0,125	0,125	0,31	0,31	1		
Сорбоза (сорбция)	20	3		3,6	3,38	4,1	4,2	6,5	8,75	1,3	16,2		
		1	3,5	1,29	Увеличение веса								
		1	3,59	Плавнение									
Сорбоза (сорбция)	40	1		плав-ся									
		1	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	1	4	
		1	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	6	9	
Сорбоза (сорбция)	333	1	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	10	13	

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Пирамеин (сорбция)		275	1	0,025	
			2	53,31	
			3	0,125	
Пирамеин (сорбция)		293	1	0,025	
			2	57,2	
			3	0,125	
		313	1	0,02	
			2	59,15	
			3	0,125	
Пирамеин (сорбция)		273	1	0,03	
			2	53,31	
			3	0,125	
			4		
			5		
			6		
Пирамеин (десорбция)		293	1	0,025	
			2	57,2	
			3	0,33	
			4	0,04	
Пирамеин (десорбция)		313	1	0,05	
			2	59,82	
			3	0,5	
			4	0,3	
			5	0,15	
			6	153,72	
Амидопирин 1-фенил, 2, 3-диметил-4-диметил-аминопиразолон-5 (порошок). Пластинчатые кристаллы белого цвета, параллелепипеды, квадратики, брусочки	192	293	1	0	
			2	57,2	
			3		
Норсульфазол (порошок). Пластинки неправильной формы, ромбики, иногда игольчатые	109	293	1		
			2		
			3		
Цвет белый		275	1	3,5	
Гидрат		293	1	3,59	
		303	1	Рас	
Сорбоза (сорбция)	20	293	1	0,29	
	40	313	1	0,29	
		333	1	0,29	

Относительная влажность		
0,2	0,3	0,4
0,05	0,09	0,1
37,96	27,87	20,1
0,125	0,125	0,1
0,05	0,05	0,0
37,26	27,84	21,2
0,125	0,125	0,1
0,05	0,08	0,1
41,34	30,94	23,5
0,125	0,125	1,3
0,2	0,41	0,6
37,96	27,87	21,8
2,05	2,05	2,0
0,166	0,066	0,16
0,33	0,33	0,33
82,25	72,95	66,45
0,1	0,3	0,5
37,26	27,84	21,21
0,166	0,166	0,166
0,02	0,02	0,02
0,05	0,1	0,3
41,9	31,4	23,9
0,5	2,1	2,1
0,3	0,4	0,3
0,15	0,63	0,63
135,8	125,3	117,8
0	0,01	0,01
39,98	29,91	22,77
	0,288	0,288
		0,01
		22,77
		0,125
3,6	3,38	4,1
1,29		
плав-	Увеличение	
ся	веса	
0,29	Плавление	
0,29		
0,29	0,29	0,29
	0,29	0,29
	0,29	0,29

Относительная влажность воздуха ϕ

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
0,05 37,96 0,125	0,09 27,87 0,125	0,100 20,8 0,125	0,125 16,05 0,78	0,18 11,83 1,08	0,22 8,258 1,08	0,25 5,167 2,66	0,4 2,44 6,5	0,83 1,3 11
0,05 37,26 0,125	0,05 27,84 0,125	0,07 21,21 0,125	0,1 16,05 0,78	0,15 11,83 1,33	0,2 8,258 1,33	0,25 5,167 2,66	0,405 2,44 6,5	0,82 11
0,05 41,34 0,125	0,08 30,94 0,125	0,18 23,54 1,33	0,15 17,81 1,33	0,18 13,12 1,33	0,21 9,165 1,5	0,25 5,735 2,66	0,405 2,7 6,5	
0,2 37,96 2,05 0,166 0,33 82,25	0,41 27,87 2,05 0,066 0,33 72,95	0,6 21,81 2,05 0,166 0,33 66,45	0,65 16,05 2,05 0,166 0,33 61,35	0,7 11,83 2,05 0,166 0,33 57,25	0,79 8,258 2,05	0,8 5,167 2,05	0,9 2,44	1,3
0,1 37,26 0,166 0,02	0,3 27,84 0,166 0,02	0,5 21,21 0,166 0,02	0,6 16,05 0,166 0,02	0,65 11,83 0,166 0,02	0,65 8,258 0,166 0,02	0,7 5,167 0,166 0,02	0,85 2,617 0,166 0,02	1,2
0,05 41,9 0,5 0,3 0,15 135,8	0,1 31,4 2,1 0,4 0,63 125,3	0,3 23,9 2,1 0,3 0,63 117,8	0,4 18,1 2,1 0,3 0,63 112	0,5 13,3 2,1 0,3 0,63 107,2	0,6 9,3 2,1 0,3 0,63 103,2	0,7 5,8 3,3 0,3 0,63 99,7	0,85 2,7 20,7	1,2 1,3
0 39,98	0,01 29,91 0,288	0,01 22,77 0,288	0,01 17,22 0,288	0,01 12,69 0,288	0,02 8,86 0,288	0,03 5,546 0,288	0,04 2,61 0,5	1,25
3,6 1,29	3,38	4,1	4,2	6,5	8,75	1,3	16,2	
плав- ся	Увеличение веса		Плавление					
0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	1	4
0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	6	9
0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,29	0,5	10	13

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
МАК-γ-лактон 2,3 дегидро-1-гулоновой кислоты. Белые кристаллы в основном пластинчатые, кв драты, иногда поломанные	60	293	2	55,72	
		313	2	59,82	
		333	2	65,00	
		293	3		
		313	3		
		333	3		
		293	1	0,006	
		275	1	0	
		313	1		
		273	2	53,31	
		313	2	61,10	
		333	2	65,00	
		293	3	0,0062	
		333	3		
		313	3		
		293	4	0,35	
		273	4		
		313	4	0,165	
		293	5	0,21	
		Кофеин бензоат натрия. Мелкие кристаллы белого цвета (не прозрачные)	60	313	5
293	5			158,5	
313	6			111,46	
293	6				
293	1			0,14	
275	1			0,0107	
313	1			0,05	
293	2			57,2	
275	2			53,31	
313	2			61,10	
293	3			0,22	
275	3			0,5	
313	3			0,49	
293	4			1,08	
275	4				
313	4				
293	1			0,071	
275	1			0,071	
313	1			0,071	
Анальгин (сорбция). 1-фенил-2,3-диметил-4-метил-аминопиразолон-5	60			293	2
		275	2	53,31	
		313	2	61,00	
		293	3	0,0062	
		275	3		
		313	3		
		293	3		
		375	3		

Относительная влажность воздуха φ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,542	2,614	1,2488	
41,81	31,27	23,8	18	13,32	9,26	5,79	2,739		
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,06	6,303	2,60	1,42	
					5	5	20	250	
					5	5	20	250	
					5	5	20	250	
0,011	0,013	0,015	0,0257	0,0356	0,0537	0,0791	0,255	0,699	
0	0	0	0,0045	0,010	0,0162	0,0245	0,121	0,175	
0,0044	—	—	—	0,017	0,032	0,084	0,32	0,74	
37,95	27,87	20,80	16,050	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2488	
42,7	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,79	1,33	
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,00	6,303	2,60	1,42	
0,1645	—	—	0,376		0,9	—	32,8	32,8	
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55	
				0,27	1,08	—	3,57	100	
0,26	0,26			0,17	0,145	0,065	0,055		
				4,35	2,05	2,45	1,1		
	0,04			0,046	0,03	0,04	0,025		
					13,05		180,4		
				1,24	3,24		8,92		
115,2				62,28	51,15	24,4	18,66	—	
—	33,77				22,36	—	10,55	—	
0,237	0,261	0,375	0,545	0,705	1,07	2,468	4,475	5,745	
0,09	0,669	0,924	1,04	1,357	1,914	2,389	4,802	5,5	
0,125	0,33	0,595	0,74	0,9	1,143	1,73	5,251	5,745	
39,28	29,91	22,79	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172	
42,71	30,96	24,32	18,40	13,56	9,468	5,94	2,797	1,33	
	1	2,55		5,07		49,69			
	4,6	4,6	4,6	4,6					
1,01	3,03	3,03	3,03	3,03	9,23	49,69			
	0,27	0,55	0,7	0,77	0,66				
	0,77	0,69	0,66	0,33	0,166				
	0,3	0,35	0,275						
0,068	0,064	0,064	0,064	0,064	0,71	0,08	0,088	0,129	
0,0622	0,066	0,064	0,064	0,064	0,069	0,08	0,095	0,129	
0,0715	0,0663	0,0648	0,0648	0,0648	0,069	0,09	0,099	0,096	
39,284	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172	
42,71	31,86	24,32	18,40	13,56	9,468	5,169	2,440	1,33	
—	0,0169	—	—	0,376	—	0,9	32,8	32,8	
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55	
				0,27	1,08		3,57	100	

МАК-γ-лактон 2,3 дегидро-*l*-гу-
лоновой кислоты.
Белые кристаллы в основном
пластинчатые, квадраты, иногда
поломанные

Кофеин бензоат натрия.
Мелкие кристаллы белого цвета
(не прозрачные)

Анальгин (сорбция).
1-фенил-2,3-диметил-4-метил-
аминопиразолон-5

293	3	65,00
313	3	
333	3	
293	1	0,006
275	1	0
313	1	
273	2	53,31
313	2	61,10
333	2	65,00
293	3	0,0062
333	3	
313	3	
293	4	0,35
273	4	
313	4	0,165
293	5	0,21
313	5	
293	6	158,5
313	6	111,46
293	1	0,14
275	1	0,0107
313	1	0,05
293	2	57,2
275	2	53,31
313	2	61,10
293	3	0,22
275	3	0,5
313	3	0,49
293	4	1,08
275	4	
313	4	
293	1	0,071
275	1	0,071
313	1	0,071
293	2	57,2
275	2	53,31
313	2	61,00
293	3	0,0062
375	3	
313	3	

41,81	31,27	23,8	18	13,32	9,26	5,79	2,739	1,2488
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,06	6,303	2,60	1,42
					5	5	20	250
					5	5	20	250
					5	5	20	250
0,011	0,013	0,015	0,0257	0,0356	0,0537	0,0791	0,255	0,699
0	0	0	0,0045	0,010	0,0162	0,0245	0,121	0,175
0,0044	—	—	—	0,017	0,032	0,084	0,32	0,74
37,95	27,87	20,80	16,050	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2488
42,7	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,79	1,33
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,00	6,303	2,60	1,42
0,1645	—	—	0,376		0,9	—	32,8	32,8
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55
				0,27	1,08	—	3,57	100
0,26	0,26			0,17	0,145	0,065	0,055	
	0,04			4,35	2,05	2,45	1,1	
				0,046	0,03	0,04	0,025	
					13,05		180,4	
				1,24	3,24		8,92	
115,2				62,28	51,15	24,4	18,66	—
—	33,77				22,36	—	10,55	—
0,237	0,261	0,375	0,545	0,705	1,07	2,468	4,475	5,745
0,09	0,669	0,924	1,04	1,357	1,914	2,389	4,802	5,5
0,125	0,33	0,595	0,74	0,9	1,143	1,73	5,251	5,745
39,28	29,91	22,79	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172
42,71	30,96	24,32	18,40	13,56	9,468	5,94	2,797	1,33
	1	2,55		5,07		49,69		
	4,6	4,6	4,6	4,6				
1,01	3,03	3,03	3,03	3,03	9,23	49,69		
	0,27	0,55	0,7	0,77	0,66			
	0,77	0,69	0,66	0,33	0,166			
	0,3	0,35	0,275					
0,068	0,064	0,064	0,064	0,064	0,71	0,08	0,088	0,129
0,0622	0,066	0,064	0,064	0,060	0,069	0,08	0,095	0,129
0,0715	0,0663	0,0648	0,0648	0,065	0,069	0,09	0,099	0,096
39,284	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172
42,71	31,86	24,32	18,40	13,56	9,468	5,169	2,440	1,33
—	0,0169	—	—	0,376	—	0,9	32,8	32,8
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55
				0,27	1,08		3,57	100

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
МАК-γ-лактон 2,3 дегидро- <i>l</i> -гу- лоновой кислоты. Белые кристаллы в основном пластинчатые, квадраты, иногда поломанные	60	293	2	55,72	
		313	2	59,82	
		333	2	65,00	
		293	3		
		313	3		
		333	3		
		293	1	0,006	
		275	1	0	
		313	1		
		273	2	53,31	
		313	2	61,10	
		333	2	65,00	
		293	3	0,0062	
		333	3		
		313	3		
		293	4	0,35	
		273	4		
		313	4	0,165	
Кофеин бензоат натрия. Мелкие кристаллы белого цвета (не прозрачные)	60	293	5	0,21	
		313	5		
		293	6	158,5	
		313	6	111,46	
		293	1	0,14	
		275	1	0,0107	
		313	1	0,05	
		293	2	57,2	
		275	2	53,31	
		313	2	61,10	
		293	3	0,22	
		275	3	0,5	
Анальгин (сорбция). 1-фенил-2,3-диметил-4-метил- аминопиразолон-5	60	313	3	0,49	
		293	4	1,08	
		275	4		
		313	4		
		293	1	0,071	
		275	1	0,071	
		313	1	0,071	
		293	2	57,2	
		275	2	53,31	
		313	2	61,00	
	60	293	3	0,0062	
		375	3		
		313	3		

Относительная	
0,2	
39,98	
41,81	
45,43	
0,011	
0	
0,0044	
37,95	
42,7	
45,43	
0,1645	
0,26	
115,2	
—	
0,237	
0,09	
0,125	
39,28	
37,26	
42,71	
1,01	
0,068	
0,0622	
0,0715	
39,284	
37,26	
42,71	
—	

Относительная влажность воздуха φ

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,542	2,614	1,2488
41,81	31,27	23,8	18	13,32	9,26	5,79	2,739	
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,06	6,303	2,60	1,42
					5	5	20	250
					5	5	20	250
					5	5	20	250
0,011	0,013	0,015	0,0257	0,0356	0,0537	0,0791	0,255	0,699
0	0	0	0,0045	0,010	0,0162	0,0245	0,121	0,175
0,0044	—	—	—	0,017	0,032	0,084	0,32	0,74
37,95	27,87	20,80	16,050	11,83	8,258	5,167	2,44	1,2488
42,7	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,79	1,33
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,00	6,303	2,60	1,42
0,1645	—	—	0,376		0,9	—	32,8	32,8
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55
				0,27	1,08	—	3,57	100
0,26	0,26			0,17	0,145	0,065	0,055	
				4,35	2,05	2,45	1,1	
	0,04			0,046	0,03	0,04	0,025	
					13,05		180,4	
115,2				1,24	3,24		8,92	
—	33,77			62,28	51,15	24,4	18,66	—
					22,36	—	10,55	—
0,237	0,261	0,375	0,545	0,705	1,07	2,468	4,475	5,745
0,09	0,669	0,924	1,04	1,357	1,914	2,389	4,802	5,5
0,125	0,33	0,595	0,74	0,9	1,143	1,73	5,251	5,745
39,28	29,91	22,79	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172
42,71	30,96	24,32	18,40	13,56	9,468	5,94	2,797	1,33
	1	2,55		5,07		49,69		
	4,6	4,6	4,6	4,6				
1,01	3,03	3,03	3,03	3,03	9,23	49,69		
	0,27	0,55	0,7	0,77	0,66			
	0,77	0,69	0,66	0,33	0,166			
	0,3	0,35	0,275					
0,068	0,064	0,064	0,064	0,064	0,71	0,08	0,088	0,129
0,0622	0,066	0,064	0,064	0,060	0,069	0,08	0,095	0,129
0,0715	0,0663	0,0648	0,0648	0,065	0,069	0,09	0,099	0,096
39,284	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,619	1,2488
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	5,169	2,44	0,172
42,71	31,86	24,32	18,40	13,56	9,468	5,169	2,440	1,33
—	0,0169	—	—	0,376	—	0,9	32,8	32,8
				0,0445	0,58	3,55	3,55	3,55
				0,27	1,08		3,57	100

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, K	Обозначение параметра и его размерность*		
				0,1	
Белый или белый с едва заметным желтоватым оттенком, крупноигольчатый, кристаллический порошок без запаха, горьковатого вкуса		293	4	0,35	
		275	4		
		313	4		
		293	5	0,21	
		313	5		
		293	6	158,5	
Глюконат кальция. Белый зернистый или кристаллический порошок без запаха и вкуса		313	6	—	
		293	1	0,5	
		275	2	6	
Азоребитиламин, полупродукт при производстве витамина B ₂		313	3	1,78	
		313	1	0,035	
Кристаллический материал, ярко оранжевого цвета, глинообразной консистенции		313	2	61,10	
		313	3		
Кристаллы игольчатые, хрупкие без внутренних пор, размер кристаллов колеблется от 1 до 10 мкм		293	1	0	
		273	1	0	
Барбитуровая кислота, полупродукт витамина B ₂		293	2	57,2	
		275	2	53,31	
		293	3		
		273	3		
Кристаллический материал, кристаллы неправильной формы с плавно очерченными краями, встречаются непрозрачные агрегаты		227	1	0,02	
		293	1	0,01	
Сахарная пудра			2	57,2	
		293	1	0,02	
Сахарный песок		279	1	0,01	
		293	1	0,01	
		308	1	0,02	
		323	1	0,03	
Бесцветные кристаллы или кристаллический		333	2	54,28	

Относительная влажность воздуха φ									
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95	
0,17						0,145	0,055		
0,165		0,04		0,04		0,03	0,025		
	0,28	0,064			1,08	13,5	180,4		
						8,9			
	79,09	—	—	—	—	47,82	18,66		
—	—	36,3	—	25,82	—	15,18	10,57	—	
88,37									
0,7	0,9	1	1,1	1,3	1,5	2,1	3,2	6,5	
39,14	29,28	22,28	16,85	12,47	8,67	5,42	2,56	1,25	
1,78	1,8	1,8	2,37		7,8	2,7	27		
0,075	0,12	0,16	0,2	0,225	0,225	0,225	0,27	0,326	
42,71	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,797	1,33	
	0,68			1,87			7,34	12,2	
0,012	0,012	0,012	0,02	1,15	3,56	11,31	23,8	26,2	
0	0	0	0	1,1	3,5	12,5	25	26,2	
39,98	29,01	22,77	17,82	12,69	8,865	5,546	2,61	1,25	
37,96	27,87	20,80	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,30	
				71	71	225	367,5	367,5	
				71	71	225	367,5	367,5	
0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—	
0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,27	0,7	—	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	—	
0,03	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—	
0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,2	0,27	0,7	—	
							0,8	—	
							—	—	
0,01	0,15	0,02	0,02	0,025	0,04	0,17	—	—	
0,03	0,06	0,09	0,19	0,38	0,62	0,82	—	—	
0,05	0,07	0,12	0,29	0,5	0,82	—	—	—	
37,94	28,38	21,60	16,34	12,04	8,39	5,26	2,48	1,72	
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	1,2488	
42,02	31,35	23,93	18,10	13,34	9,316	5,83	2,753		
		25,10	18,99	13,99	9,77	6,11	2,88		
					10,07	6,3	2,97		

Глюконат кальция.
Белый зернистый или кристал-
лический порошок без запаха и
вкуса

Азоребитиламин, полупродукт
при производстве витамина B_2

Кристаллический материал, ярко
оранжевого цвета, глинообраз-
ной консистенции

Кристаллы игольчатые, хрупкие
без внутренних пор, размер
кристаллов колеблется от 1 до
10 мкм

Барбитуровая кислота, полупро-
дукт витамина B_2

Кристаллический материал,
кристаллы неправильной формы
с плавно очерченными краями,
встречаются непрозрачные агре-
гаты

Сахарная пудра

Сахарный песок

Бесцветные кристаллы или
белый мелкокристаллический
порошок со сладким вкусом

293	313	6	158,5	—	79,09	—	—	1,08	—	47,82	8,9	—
293	293	1	—	88,37	—	36,3	—	25,82	—	15,18	18,66	—
275	275	2	0,5	0,7	0,9	1	1,1	1,3	1,5	2,1	3,2	6,5
313	313	3	6	39,14	29,28	22,28	16,85	12,47	8,67	5,42	2,56	1,25
			1,78	1,78	1,8	1,8	2,37		7,8	2,7	27	
	313	1	0,035	0,075	0,12	0,16	0,2	0,225	0,225	0,225	0,27	0,326
	313	2	61,10	42,71	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,797	1,33
	313	3			0,68			1,87			7,34	12,2
	293	1	0	0,012	0,012	0,012	0,02	1,15	3,56	11,31	23,8	26,2
	273	1	0	0	0	0	0	1,1	3,5	12,5	25	26,2
	293	2	57,2	39,98	29,01	22,77	17,82	12,69	8,865	5,546	2,61	1,25
	275	2	53,31	37,96	27,87	20,80	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,30
	293	3						71	71	225	367,5	367,5
	273	3						71	71	225	367,5	367,5
	227	1	0,02	0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—
	293	1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,27	0,7	—
		2	57,2	39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	—
	293	1	0,02	0,03	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—
	279	1	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,2	0,27	0,7	—
	293	1	0,01	0,01	0,15	0,02	0,02	0,025	0,04	0,17	0,8	—
	308	1	0,02	0,03	0,06	0,09	0,19	0,38	0,62	0,82	—	—
	323	1	0,03	0,05	0,07	0,12	0,29	0,5	0,82	—	—	—
	333	1	54,28	37,94	28,38	21,60	16,34	12,04	8,39	5,26	2,48	1,72
	279	2	57,2	39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	1,2488
	293	2	60,12	42,02	31,35	23,93	18,10	13,34	9,316	5,83	2,753	—
	308	2	63,05	44,07	32,97	25,10	18,99	13,99	9,77	6,11	2,88	—
	323	2	65,00	45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,07	6,3	2,97	—
	333	3	0,063	0,063	0,18	0,18	0,2	0,5	1	4,3	—	—
	279											

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1	
Белый или белый с едва замет- ным желтоватым оттенком, круп- ноигольчатый, кристаллический порошок без запаха, горькова- того вкуса		293	4	0,35	
		275	4		
		313	4		
		293	5	0,21	
		313	5		
		293	6		
Глюконат кальция. Белый зернистый или кристал- лический порошок без запаха и вкуса		313	6	158,5	
		293	6	—	
		275	1	0,5	
		313	2	6	
			3	1,78	
		313	1	0,035	
Кристаллический материал, ярко оранжевого цвета, глинообраз- ной консистенции		313	2	61,10	
		313	3		
Кристаллы игольчатые, хрупкие без внутренних пор, размер кристаллов колеблется от 1 до 10 мкм		293	1	0	
		273	1	0	
		293	2	57,2	
		275	2	53,31	
		293	3		
		273	3		
Барбитуровая кислота, полупро- дукт витамина B ₂		293	1	0,02	
		293	1	0,01	
Кристаллический материал, кристаллы неправильной формы с плавно очерченными краями, встречаются непрозрачные агре- гаты		293	2	57,2	
		293	1	0,02	
Сахарная пудра	227	293	1	0,01	
		293	2	57,2	
Сахарный песок		293	1	0,02	
		279	1	0,01	
Бесцветные кристаллы или белый мелкокристаллический порошок со сладким вкусом		293	1	0,01	
		308	1	0,02	
		323	1	0,03	
		333	1	0,02	
		279	2	54,28	
		293	2	57,2	
		308	2	60,12	
		323	2	63,05	
		333	2	65,00	
		279	3	0,063	

Относитель	
0,2	
0,17	
0,165	0,1
—	79,2
88,37	—
0,7	0,1
39,14	29,2
1,78	1,8
0,075	0,1
42,71	31,96
	0,68
0,012	0,012
0	0
39,98	29,01
37,96	27,87
0,05	0,05
0,02	0,03
39,98	29,91
0,03	0,05
0,02	0,03
0,01	0,15
0,03	0,06
0,05	0,07
37,94	28,38
39,98	29,91
42,02	31,35
44,07	32,97
45,43	34,00
0,063	0,1

Относительная влажность воздуха φ

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
0,17						0,145	0,055	
0,165	0,28	0,04 0,064		0,04		0,03 13,5	0,025 180,4	
—	79,09	—	—	1,08	—	47,82	8,9	
88,37	—	36,3	—	25,82	—	15,18	18,66	—
0,7	0,9	1	1,1	1,3	1,5	2,1	3,2	6,5
39,14	29,28	22,28	16,85	12,47	8,67	5,42	2,56	1,25
1,78	1,8	1,8	2,37		7,8	2,7	27	
0,075	0,12	0,16	0,2	0,225	0,225	0,225	0,27	0,326
42,71	31,96	24,32	18,40	13,56	9,46	5,92	2,797	1,33
	0,68			1,87			7,34	12,2
0,012	0,012	0,012	0,02	1,15	3,56	11,31	23,8	26,2
0	0	0	0	1,1	3,5	12,5	25	26,2
39,98	29,01	22,77	17,82	12,69	8,865	5,546	2,61	1,25
37,96	27,87	20,80	16,05	11,83	8,258	5,167	2,44	1,30
				71	71	225	367,5	367,5
				71	71	225	367,5	367,5
0,05	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—
0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,1	0,27	0,7	—
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	—
0,03	0,05	0,06	0,07	0,09	0,12	0,35	—	—
0,02	0,03	0,04	0,05	0,07	0,2	0,27	0,7	—
0,01	0,15	0,02	0,02	0,025	0,04	0,17	0,8	—
0,03	0,06	0,09	0,19	0,38	0,62	0,82	—	—
0,05	0,07	0,12	0,29	0,5	0,82	—	—	—
37,94	28,38	21,60	16,34	12,04	8,39	5,26	2,48	1,72
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	5,54	2,61	1,2488
42,02	31,35	23,93	18,10	13,34	9,316	5,83	2,753	—
44,07	32,97	25,10	18,99	13,99	9,77	6,11	2,88	—
45,43	34,00	25,87	19,57	14,42	10,07	6,3	2,97	—
0,063	0,18	0,18	0,2	0,5	1	4,3	—	—

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	0,1	
				0,1	
Пирамеин (десорбция)	293		3	0,058	
	308		3	0,96	
	323		3		
	333		3	0,63	
	293		3		
	273		1	0,075	
	293		1	0,02	
	313		1	0,02	
	275		2	53,31	
	293		2	57,2	
	313		2	61,10	
	275		3	0	
	293		3	3,8	
	313		3	0,09	
Пирамеин (сорбция)	293		1	0,025	
	273		1	0,08	
	313		1	0,05	
	293		2	57,2	
	275		2	53,31	
	313		2	56,10	
	293		3	—	
	275		3	—	
	313		3	—	
Крахмал (сорбция), белый матовый, тонкий порошок без запаха и вкуса [29]	129		1	0,024	
			1	0,0414	
			2	57,20	
			3	0,077	
			3	0,0952	
			7	497,48	
			1	—	
			2	—	
			3	—	
			7	—	
Тальк [29]	248		1	—	
			2	—	
			3	—	
			7	—	
Желатин	294		1	0,0292	
			2	57,59	
			3	0,15	
			7	497,2	
Желатин (десорбция)	294		1	0,05	
			2	57,59	
			3	0,157	
			7	497,2	

Относительная влажность воздуха φ								
0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
0,058	0,125	0,125	0,16	0,5	0,75	2	420	
0,57	0,57	0,5	0,142	0,07				
0,96	0,57	0,53	0,57	0,142				
0,094	0,1	0,09	0,114	0,075				
0,05	0,07	0,06	0,09	0,071				
0,075	0,08	0,05	0,65	0,7	0,7	0,15	0,80	1,20
	0,05	0,30	0,6	0,65	0,650	0,65	0,75	0,95
0,03	0,04	0,06	0,08	0,25	0,6	0,75	0,8	1,0
37,26	27,87	21,21	11,95	11,83	8,258	5,167	2,44	—
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	
0	5,7	5,7	5,7	1,25	1,25	10	10	
3,8	3,8	3,8	5	5	5	0,5	0,5	
0,09	0,09	0,4	0,9	2,4	8,7	22,2	22,2	
0,06	0,1	0,12	0,10	0,1	0,1	0,1	0,14	0,23
0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12	0,35
0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,3
39,98	29,91	28,77	17,22	12,69	8,863	5,5446	2,619	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	2,167	2,44	
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	
—	—	—	—	7	7	7	7	
—	—	—	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	
—	—	—	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	
0,04	0,055	0,065	0,075	0,085	0,096	0,109	0,127	0,359
0,0676	0,0897	0,109	0,130	0,145	0,171	0,226	0,26	0
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	6,546	2,619	
0,107	0,143	0,193	0,211	0,25	0,318	0,5	0,833	3,06
0,222	0,242	0,292	0,36	0,513	0,971	0,88	2,58	440,28
480,26	470,19	463,05	457,5	452,97	449,14	445,83	442,9	
—	—	—	—	0,0008	0,001	0,0018	0,0025	
—	—	—	—	12,69	8,863	5,546	2,619	
—	—	—	—	0,0048	0,0107	0,0267	0,0313	
—	—	—	—	453,0	449,1	445,8	442,3	
0,0534	0,0751	0,1	0,128	0,161	0,195	0,235	0,358	1,1
40,25	30,12	23,92	17,34	12,78	8,923	5,583	2,636	17
0,257	0,35	0,527	0,666	0,93	1,38	2,33	6,66	17
479,2	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	439,6
0,0767	0,104	0,133	0,163	0,191	0,221	0,253	0,4	1,1
40,25	30,12	22,92	17,37	12,78	8,923	5,583	2,636	
0,25	0,385	0,5	0,75	1	1,4	2,2	6,93	
477,8	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	

$$-\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5} \text{ Дж/моль} \cdot \text{К}; 5 - \delta \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}; 6 - q_d \cdot 10^{-5} \text{ Дж/моль};$$

Пирамеин (сорбция)

Крахмал (сорбция), белый матовый, тонкий порошок без запаха и вкуса [29]

Тальк [29]

Желатин

Желатин (десорбция)

* 1 — $u \cdot 10^2$ кг/кг; 2 — $\mu \cdot 10^{-5}$ Дж/моль; 3 — $c'_m \cdot 10^9$ моль/Дж; 4 —
7 — $g_t \cdot 10^{-5}$ Дж/моль.

0,075	0,08	0,05	0,65	0,7	0,7	0,15	0,80	1,20
0,03	0,05	0,30	0,6	0,65	0,650	0,65	0,75	0,95
0,04	0,06	0,08	0,25	0,6	0,75	0,8	1,0	—
37,26	27,87	21,21	11,95	11,83	8,258	5,167	2,44	—
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	—
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	—
0	5,7	5,7	5,7	1,25	1,25	10	10	—
3,8	3,8	3,8	5	5	5	0,5	0,5	—
0,09	0,09	0,4	0,9	2,4	8,7	22,2	22,2	—
0,06	0,1	0,12	0,10	0,1	0,1	0,1	0,14	0,23
0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12	0,35
0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,3
39,98	29,91	28,77	17,22	12,69	8,863	5,5446	2,619	—
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	2,167	2,44	—
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	—
—	—	—	—	7	7	7	7	—
—	—	—	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	—
—	—	—	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	—
0,04	0,055	0,065	0,075	0,085	0,096	0,109	0,127	0,359
0,0676	0,0897	0,109	0,130	0,145	0,171	0,226	0,26	0
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	6,546	2,619	—
0,107	0,143	0,193	0,211	0,25	0,318	0,5	0,833	3,06
0,222	0,242	0,292	0,36	0,513	0,971	0,88	2,58	440,28
480,26	470,19	463,05	457,5	452,97	449,14	445,83	442,9	—
—	—	—	—	0,0008	0,001	0,0018	0,0025	—
—	—	—	—	12,69	8,863	5,546	2,619	—
—	—	—	—	0,0048	0,0107	0,0267	0,0313	—
—	—	—	—	453,0	449,1	445,8	442,3	—
0,0534	0,0751	0,1	0,128	0,161	0,195	0,235	0,358	1,1
40,25	30,12	23,92	17,34	12,78	8,923	5,583	2,636	17
0,257	0,35	0,527	0,666	0,93	1,38	2,33	6,66	17
479,2	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	439,6
0,0767	0,104	0,133	0,163	0,191	0,221	0,253	0,4	1,1
40,25	30,12	22,92	17,37	12,78	8,923	5,583	2,636	—
0,25	0,385	0,5	0,75	1	1,4	2,2	6,93	—
477,8	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	—

— $\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5}$ Дж/моль·К; 5 — $\delta \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; 6 — $q_d \cdot 10^{-5}$ Дж/моль;

Материал, его характеристика, изотермы	d	T, К	Обозначение параметра и его размерность*	Относительная влажность	
				0,2	0,3
Пирамеин (десорбция)	293		3	0,058	0,12
	308		3	0,96	0,57
	323		3		0,57
	333		3	0,63	0,1
	293		3		0,07
	273		1	0,075	0,08
	293		1	0,02	0,05
	313		1	0,02	0,04
	275		2	53,31	27,87
	293		2	57,2	29,91
	313		2	61,10	31,96
	275		3	0	5,7
	293		3	3,8	3,8
	313		3	0,09	0,09
Пирамеин (сорбция)	293		1	0,025	0,1
	273		1	0,08	0,08
	313		1	0,05	0,05
	293		2	57,2	29,91
	275		2	53,31	27,87
	313		2	56,10	31,96
	293		3	—	—
	275		3	—	—
	313		3	—	—
Крахмал (сорбция), белый матовый, тонкий порошок без запаха и вкуса [29]	129		1	0,024	0,04
			1	0,0414	0,055
			2	57,20	0,0897
			3	0,077	29,91
			3	0,0952	0,143
			7	497,48	0,242
					470,19
Тальк [29]	248		1	—	—
			2	—	—
			3	—	—
Желатин			7	—	—
	294		1	0,0292	0,0534
			2	57,59	40,25
			3	0,15	0,257
Желатин (десорбция)	294		7	497,2	479,2
			1	0,05	0,0751
			2	57,59	30,12
			3	0,157	0,35
			7	497,2	469,7

* 1 — $u \cdot 10^2$ кг/кг; 2 — $\mu \cdot 10^{-5}$ Дж/моль; 3 — $c'_m \cdot 10^9$ моль/Дж; 4 —
7 — $g_t \cdot 10^{-5}$ Дж/моль.

Относительная влажность	
0,2	0,3
0,058	0,12
0,57	0,57
0,96	0,57
0,094	0,1
0,05	0,07
0,075	0,08
	0,05
0,03	0,04
37,26	27,87
39,98	29,91
42,71	31,96
0	5,7
3,8	3,8
0,09	0,09
0,06	0,1
0,08	0,08
0,05	0,05
39,98	29,91
37,26	27,87
42,71	31,96
—	—
—	—
—	—
0,04	0,055
0,0676	0,0897
39,98	29,91
0,107	0,143
0,222	0,242
480,26	470,19
—	—
—	—
—	—
—	—
0,0534	0,0751
40,25	30,12
0,257	0,35
479,2	469,7
0,0767	0,104
40,25	30,12
0,25	0,385
477,8	469,7

— $\left(\frac{\partial \mu}{\partial T} \right)_u \cdot 10^{-5}$

Относительная влажность воздуха φ

0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,95
0,058	0,125	0,125	0,16	0,5	0,75	2	420	
0,57	0,57	0,5	0,142	0,07				
0,96	0,57	0,53	0,57	0,142				
0,094	0,1	0,09	0,114	0,075				
0,05	0,07	0,06	0,09	0,071				
0,075	0,08	0,05	0,65	0,7	0,7	0,15	0,80	1,20
	0,05	0,30	0,6	0,65	0,650	0,65	0,75	0,95
0,03	0,04	0,06	0,08	0,25	0,6	0,75	0,8	1,0
37,26	27,87	21,21	11,95	11,83	8,258	5,167	2,44	—
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,863	5,546	2,619	
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	
0	5,7	5,7	5,7	1,25	1,25	10	10	
3,8	3,8	3,8	5	5	5	0,5	0,5	
0,09	0,09	0,4	0,9	2,4	8,7	22,2	22,2	
0,06	0,1	0,12	0,10	0,1	0,1	0,1	0,14	0,23
0,08	0,08	0,08	0,1	0,1	0,1	0,12	0,12	0,35
0,05	0,05	0,06	0,06	0,08	0,08	0,08	0,1	0,3
39,98	29,91	28,77	17,22	12,69	8,863	5,5446	2,619	
37,26	27,87	21,21	16,05	11,83	8,258	2,167	2,44	
42,71	31,96	24,32	18,4	13,56	9,46	5,92	2,79	
—	—	—	—	7	7	7	7	
—	—	—	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	
—	—	—	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	
0,04	0,055	0,065	0,075	0,085	0,096	0,109	0,127	
0,0676	0,0897	0,109	0,130	0,145	0,171	0,226	0,26	0,359
39,98	29,91	22,77	17,22	12,69	8,86	6,546	2,619	0
0,107	0,143	0,193	0,211	0,25	0,318	0,5	0,833	
0,222	0,242	0,292	0,36	0,513	0,971	0,88	2,58	3,06
480,26	470,19	463,05	457,5	452,97	449,14	445,83	442,9	440,28
—	—	—	—	0,0008	0,001	0,0018	0,0025	
—	—	—	—	12,69	8,863	5,546	2,619	
—	—	—	—	0,0048	0,0107	0,0267	0,0313	
—	—	—	—	453,0	449,1	445,8	442,3	
0,0534	0,0751	0,1	0,128	0,161	0,195	0,235	0,358	1,1
40,25	30,12	23,92	17,34	12,78	8,923	5,583	2,636	17
0,257	0,35	0,527	0,666	0,93	1,38	2,33	6,66	17
479,2	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	439,6
0,0767	0,104	0,133	0,163	0,191	0,221	0,253	0,4	1,1
40,25	30,12	22,92	17,37	12,78	8,923	5,583	2,636	
0,25	0,385	0,5	0,75	1	1,4	2,2	6,93	
477,8	469,7	462,5	456,9	452,3	448,5	445,1	442,2	

— $\left(\frac{\partial \mu}{\partial T}\right)_u \cdot 10^{-5}$ Дж/моль·К; 5 — $\delta \cdot 10^{-4}$ К⁻¹; 6 — $q_d \cdot 10^{-5}$ Дж/моль;

Таблица 3

Физико-механические характеристики медицинских препаратов

Препарат	Напряжение сдвига, $\tau_0/9,8 \cdot 10^4 \text{ Н/м}^2$		Коэффициент внутреннего трения μ	
	max	min	max	min
Норсульфазол (НСФ)	0,06	0	0,367	0,225
НСФ+20% 5%-ного крахмального клейстера	0,0095	0,0095	0,225	0,188
НСФ+30% 5%-ного крахмального клейстера	0,02	0,0095	0,185	0,151
НСФ+40% 5%-ного крахмального клейстера	0,02	0,01	0,253	0,169
НСФ+5% 10%-ного крахмального клейстера	0,08	0,045	0,19	0,13
НСФ+10% 10%-ного крахмального клейстера	0,06	0,015	0,17	0,14
НСФ+20% 10%-ного крахмального клейстера	0,05	0,025	0,24	0,17
Тетрациклин-0	0,055	0,02	0,225	0,192
Тетрациклин-I	0,02	0,01	0,18	0,085
Тетрациклин-II	0,06	0,045	0,125	0,075
Барбитуровая кислота	0,015	0,0095	0,218	0,185
Амидопирин	0,05	0,05	0,275	0,325
Амидопирин+3% 5%-ного крахмаль- ного клейстера	0,04	0,025	0,12	0,08
Амидопирин+5% 5%-ного крахмаль- ного клейстера	0,05	0,04	0,09	0,01
Амидопирин+3% 10%-ного крахмаль- ного клейстера	0,06	0,02	0,13	0,05
Амидопирин+5% 10%-ного крахмаль- ного клейстера	0,075	0,04	0,08	0,02
Амидопирин+3% 15%-ного крахмаль- ного клейстера	0,05	0,025	0,14	0,04
Амидопирин+5% 15%-ного крахмаль- ного клейстера	0,045	0,045	0,15	0,04

Таблица 4
Значения реологических характеристик трех партий тетрациклина

Препарат	Эластичность λ при $\sigma \cdot 10^{-4}$ Н/м ²					Область
	4,9	9,8	14,7	19,6	29,4	
ТЦО-О	—	—	0,345	—	—	Шведовская Бингамовская
ТЦО-I	0,353	0,30	0,39	0,37	0,251	Шведовская Бингамовская
	0,307	—	—	—	—	
ТЦО-II	0,3	0,424	0,409	0,39	—	Шведовская Бингамовская
	0,253	0,318	0,312	0,333	—	

Т а б л и ц а 5

Теплофизические характеристики химико-фармацевтических препаратов

Физико-химические характеристики химико-фармацевтических препаратов														
Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T , °C											
			15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Фенацеин	416	λ , Вт/м·град $\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,09 0,01 2,14								0,13 1,15 2,72			0,13 1,16 2,7
Норсульфазол	323	λ , Вт/м·град $\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,072 1,32 1,74						0,083 1,29 2,05					0,96 1,6 1,67
Тетрациклин	430	λ , Вт/м·град $\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,11 1,22 2,1		0,11 1,45 1,77		0,1					0,11 1,2		0,10 1,51 1,54
Ацетофен	720	λ , Вт/м·град $\alpha \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$						0,07 1,28 0,76		0,07 1,08 0,9		0,08 1,15 0,97		0,09 1,11 1,13

[illegible]

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T, °C											
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
Фенацеин	416	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, — кг·град				0,13 1,08 2,88		0,14 1,08 3,11		0,15 1,09 3,32		0,16 0,98 3,94		
Норсульфазол	323	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, — кг·град						0,114 1,64 1,94				0,109 1,65 1,84		0,109 1,65 1,84
Тетрациклин	430	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, — кг·град												
Ацетофен	720	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, — кг·град				0,1 1,12 1,24		0,105 1,0 1,48				0,1 0,91 1,52		0,11 0,7 1,6

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T, °C											
			15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Амидопирин	482	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$			0,091 1,07 1,77		0,107 0,98 2,26			0,109 1,32 1,96	0,115 1,35 1,94		0,127 1,37 1,92	
Тройчатка	450	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$			0,062 1,28 1,02	0,063 1,28 1,02	0,065 1,16 1,18	0,067 1,19 1,18		0,069 1,16 1,22			0,077 1,14 1,480	
Пиранал	434	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$			0,061 1,1 1,22		0,066 1,04 1,42	0,07 1,07 1,47	0,076 1,13 1,42	0,076 1,2 1,42		0,075 1,16 1,43	1,16 1,430	
Кофеин	733	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$					0,093 1,15 1,08	0,096 1,18 1,08	0,098 1,16 1,14		0,102 1,17 1,14	0,102 1,12 1,2	0,105 1,13 1,2	0,99 1,2 1,07
Пирамеин	362	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$						0,067 1,39 1,28	0,065 1,34 1,3		0,067 1,29 1,39	0,07 1,24 1,51	0,07 1,25 1,51	

[illegible]

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T , °C											
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
Амидопирин	482	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$			0,125 1,3 1,99									
Тройчатка	450	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,081 1,13 1,57	0,082 1,14 1,54		0,085 1,07 1,67		0,093 0,99 2,02	0,159 0,47 5,52					
Пиранал	434	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,076 1,19 1,43	0,081 1,22 1,43	0,083 1,23 1,5	0,094 1,19 1,76	0,108 1,15 2,06	0,142 1,05 3,02	0,212 0,78 6,05					
Кофеин	733	λ , Вт/кг·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,1 1,16 1,13	0,102 1,1 1,2	0,103 1,16 1,18									
Пирамеин	362	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,07 1,26 1,45	0,071 1,3 1,45	0,072 1,29 1,48		0,073 1,22 1,6	0,078 1,17 1,78	0,099 0,74 3,38	0,124 0,73 4,5				

Продолжение табл. 5

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T, °C											
			15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Аскорбиновая кислота	833	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, Дж кг·град				0,22 1,12	0,222 1,14			0,225 1,11	0,23 1,13	0,23 1,12		0,235 1,12
Пиперазин	650	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, Дж кг·град				2,3	2,35			2,5	2,61	2,61		2,7
Сульфадимезин	225	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, Дж кг·град	0,065 1,2	0,075 0,9			0,081 0,087		0,088 0,085		0,082 0,091			0,062 0,91 1,05
Сульфадимезин	340	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, Дж кг·град	2,3	4,85			0,06		4,08		4,03			
Фтивазид	452	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с $c \cdot 10^{-3}$, Дж кг·град	0,09 0,9 2,21	0,1 0,95 2,32			0,12 1,13 2,32		0,15 1,34 2,48		0,2 1,62 2,74			

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T, °C											
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
Аскорбиновая кислота	833	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	0,242 1,1	0,248 1,08			0,255 1,04							

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	$T, ^\circ\text{C}$											
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
Аскорбиновая кислота	833	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$		0,242 1,1	0,248 1,08		0,255 1,04							
Пиперазин	650	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$		0,069 0,96				0,073 0,75			0,085 0,69			
				1,11				1,5			1,93			
Сульфадимезин	225	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$												
Сульфадимезин	340	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	0,05 1,25		0,061 1,17		0,076 1,17		0,079 1,0			0,086 0,96		
			1,15		1,52		1,91		2,32			2,63		
Фтивазид	452	λ , Вт/м·град $a \cdot 10^{-7}$, м ² /с Дж $c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$												

Препарат	ρ , кг/м ³	Обозначения и размерность	T, °C											
			75	80	85	90	95	100	105	110	115	120	125	130
Фтивазид	310	λ , Вт/м·град	0,07	0,08		0,08	0,08		0,09		0,11	0,13		
		$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	1,08	1,24		1,24	1,28		1,33		1,22	1,35		
		$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	2,09	2,08		2,08	2,02		2,18		2,9	3,1		
Аспирин	570	λ , Вт/м·град			0,13		0,13		1,14		0,13			
		$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с			1,47		1,47		1,22		1,08			
		$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$			1,55		1,55		2,01		2,11			
Фталазол	240	λ , Вт/м·град		0,06		0,06								
		$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с		0,96		0,96								
		$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$		2,6		2,6								
Глюконат кальция	303	λ , Вт/м·град												
		$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с												
		$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$												
Глюконат кальция	290	λ , Вт/м·град	0,08			0,08		0,08		0,09				
		$a \cdot 10^{-7}$, м ² /с	1,33			1,26		1,28		1,27				
		$c \cdot 10^{-3}$, $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$	2,08			2,2		2,16		2,44				

Таблица 6

Параметры сушки в кипящем слое ряда химико-фармацевтических материалов при использовании программы АНИПР

Препарат	$W_{расч}$	$W_{к\ эксп.}$	$W_{н}$	$t_{в}$	$υр$	G/F	$d_{ср}$
Амидопирин	0,0139	0,0168	0,139	95	0,73	20	0,0015
	0,0144	0,014	0,129	85	0,73	20	0,0015
	0,0087	0,01	0,074	85	0,7	20	0,0015
	0,007	0,0058	0,075	85	0,685	27,5	0,0012
	0,006	0,006	0,0763	85	0,77	33,5	0,0015
	0,0096	0,009	0,106	90	1,27	20	0,0015
Норсульфазол	0,0075	0,0085	0,157	150	1,19	25	0,002
	0,0084	0,0081	0,141	160	0,78	20	0,002
	0,0096	0,0094	0,146	155	0,827	17,5	0,002
	0,0073	0,008	0,102	140	0,7	20	0,002
	0,0083	0,010	0,1247	140	0,84	20	0,0012
	0,0041	0,006	0,078	130	1,0	30,5	0,0015
	0,0047	0,005	0,083	130	0,75	30,5	0,0015
	0,005	0,006	0,0945	122	0,99	30,5	0,0015
Медицинская ас- корбиновая кислота (таблетлируемая)	0,006	0,0047	0,1184	130	0,97	30,9	0,0015
	0,006	0,006	0,1225	131	0,97	30,9	0,0015
	0,0056	0,008	0,112	120	1,08	34,5	0,0015
	0,0074	0,006	0,129	110	1,07	31,5	0,0015
	0,004	0,0038	0,1184	138	1,07	47,6	0,0015
	0,0048	0,004	0,1311	132	1,04	47,6	0,0015
	0,0034	0,0028	0,1183	135	1,03	65,7	0,0015
	0,0032	0,0037	0,059	110	0,485	53,9	0,0005
Медицинская ас- корбиновая кислота (кристаллическая)	0,003	0,0036	0,057	110	0,485	53,9	0,0005
	0,002	0,0018	0,059	128	0,51	77	0,0005
	0,001	0,0009	0,062	135	0,5	116,5	0,0005
	0,001	0,0008	0,058	180	0,5	77	0,0005
	0,0012	0,001	0,063	150	0,5	154	0,0005
	0,003	0,0026	0,062	165	0,49	53,9	0,0005
	0,0232	0,023	0,26	140	0,8	12,3	0,0015
	0,077	0,052	0,252	138	0,77	12,5	0,0015
Фтивазид	0,021	0,026	0,263	160	0,82	12,25	0,0015
	0,01159	0,0106	0,259	160	0,97	26,25	0,0015
	0,019	0,0124	0,255	139	0,96	14,0	0,0015
	0,0196	0,0179	0,268	144	1,05	14,0	0,0015
	0,0178	0,017	0,283	158	1,08	14,0	0,0015
	0,005	0,0048	0,142	100	1,03	69,9	0,0015
	0,0046	0,003	0,132	95	1,188	55	0,0015
Пирамеин	0,005	0,0060	0,135	95	1,32	65	0,0015
	0,0049	0,0048	0,134	100	1,05	69,9	0,0015
	0,0046	0,005	0,130	100	0,988	77,7	0,0015
	0,004	0,003	0,136	95,5	1,03	92,5	0,0015
	0,0035	0,004	0,143	94	0,88	75	0,0015

Препарат

Пиранал

Тройчатка

Гидрат

Отперфорировать
схеме: 10000↑/0,0139]
/0,0008/ 30↑/6] /58] /
Конечный блок

ср	G/F	d _{ср}
0,73	20	0,0015
0,73	20	0,0015
0,7	20	0,0015
0,685	27,5	0,0015
0,77	33,5	0,0012
1,27	20	0,0015
1,19	25	0,0015
0,78	20	0,002
0,827	17,5	0,002
0,7	20	0,002
0,84	20	0,0012
1,0	30,5	0,0015
0,75	30,5	0,0015
0,99	30,5	0,0015
0,97	30,9	0,0015
0,97	30,9	0,0015
1,08	34,5	0,0015
1,07	31,5	0,0015
1,07	47,6	0,0015
1,04	47,6	0,0015
1,03	65,7	0,0015
0,485	53,9	0,0005
0,485	53,9	0,0005
0,51	77	0,0005
0,5	116,5	0,0005
0,5	77	0,0005
0,5	154	0,0005
0,49	53,9	0,0005
0,8	12,3	0,0015
0,77	12,5	0,0015
0,82	12,25	0,0015
0,97	26,25	0,0015
0,96	14,0	0,0015
1,05	14,0	0,0015
1,08	14,0	0,0015
1,03	69,9	0,0015
1,188	55	0,0015
1,32	65	0,0015
1,05	69,9	0,0015
0,988	77,7	0,0015
1,03	92,5	0,0015
0,88	75	0,0015

Препарат	W _{расч}	W _к ЭКСП	W _н	t _в	ср	G/F	d _{ср}
Пиранал	0,0075	0,012	0,08	95	0,93	22,6	0,00056
	0,004	0,0049	0,0753	100	0,812	45,2	0,00056
	0,0037	0,0027	0,066	100	0,67	45,2	0,00056
Тройчатка	0,0035	0,0032	0,068	100	0,64	56,5	0,001
	0,0062	0,0082	0,065	98	0,56	28,2	0,00054
	0,005	0,0046	0,064	95	0,59	34	0,00054
Гидрат	0,0048	0,0035	0,059	95	0,53	34	0,00054
	0,0043	0,0046	0,063	90	0,73	40,6	0,00070
	0,0028	0,0028	0,059	90	0,77	68	0,00076
	0,0026	0,0025	0,071	85	0,63	51	0,00076
	0,0042	0,006	0,065	95	0,65	45,0	0,0008
	0,0067	0,0059	0,059	88	0,73	65	0,0008
	0,00165	0,00158	0,116	46	1,35	25	0,0008
	0,00115	0,00119	0,104	47	1,3	37,5	0,0008
	0,0104	0,0101	0,092	51	1,302	32,5	0,0008
	0,0064	0,0064	0,083	46	1,274	67,5	0,0008

Отперфорировать на УПДЛ в 10 с/с по столбцам по следующей схеме: 10000↑/0,0139] /0,019]] /0, 0064] /0,139] / 0,129]] /0,0008/ 30↑/6] /58] /1]:

Конечный блок информации

Результаты снятия материального баланса на

Время работы	Количество влажной массы, кг	W _н , %	Количество абсолютно сухого вещества во влажной массе	Количество выгруженной сухой массы
			кг	
8ч 45 мин	945,51	10	859,2	845
45 мин	98,35	12	87,8	81,5
7ч 35 мин	831,00	7,6	773,63	747,26
6ч 35 мин	250,15	6	236	226,7

Таблица 7

Уманском витаминном заводе

W _к , %	Количество абсолютно сухого материала в сухом грануляте, кг	Температурный режим сушки, °C				Остатки материала на разных операциях, %			Выход усадки на стационарный режим, мин
		температура входящего воздуха	температура выходящего воздуха	φ _н	φ _к	в циклоне	в бункере	потерь	
0,3	842,46	120	65	20	65	15	2	0,3	5
0,1	81,42	115	49	20	49	2	0,8	0,1	4
0,1	746,26	118	65	20	65	20	5	0,29	5
0,4	225,8	120	65	20	65	8,4	2		

Результаты испытания сушиллки

Время работы	Влажность, %		Температурный режим, °C			Высота слоя, мм		Гидравлическое сопротивление, мм вод.ст.	Производительность		Расход газов, кг/ч
	W _н	W _к	входящего воздуха	выходящего воздуха	в слое	плотный	кипящий		по сухому материалу	по влаге	
8ч 45 мин	10	0,3	120	65	65	170	220	85	99,4	99,4	725
45 мин	12	0,1	115	49	49	165	215	98	108,6	13	697
						192	250	105			252
						170	220	90			252
7ч 40 мин	7,6	0,1	118	65	65	155	200	80	97,8	7,28	587,4
1ч 35 мин	7	0,1	120	65	65	146	190	77	151	10,5	856
	7,8	0,1				142	185	75			252
	8	0,15	116	50	50	140	180	85	106,6	8	578,4
7ч 30 мин	7,6	0,7	118	60	60	170	200	80	116,6	8,86	510
6ч	7,6	0,3	116	50	50	150	196	80	103,5	8	478
7ч 45 мин	7,3	0,2	117	52	52	160	210	85			
Полочные сушиллки											
									92,5	2,5	1100

Таблица 8

непрерывного действия

Расход тепла, ккал/ч	Количество высушенного материала, кг	Съем влаги		Удельный расход		Расход электроэнергии		Скорость сушки, %/мин	Потери, %	КПД, %
		с единицы объема, кг/м³·ч	с единицы сечения	газа, кг/кг влаги	тепла, ккал/кг влаги	кВт·ч/кг влаги	кВт·ч/кг сухой массы			
9 650	845	12,2	50,7	73	968	0,92	0,09	2,5	0,3	61,5
11 200	81,5	16,2	70	53,6	860	0,7	0,08	3		69,2
	815									
3 180	611	9	37	80,6	1 050	1,26	0,084	1,9	0,25	5,65
11 350	747	13	52	81,6	1 080	0,85	0,06	1,5	0	55
	226,7									
	240									
8 098	800	9,9	40,8	72,3	1 012,3	1,15	0,086	1,9	0,1	58,6
8 200	700	11	45,2	57,6	926	1,04	0,08	1,9	0	64,4
7 500	800	9,9	40,8	59,7	937	1,15	0,088	1,95	0	63,5
2 662		0,033	0,089	400	1 065	0,68	0,075	0,015	1	

45 мин	98,35	7,6	87,8	81,5
7ч 35 мин	831,00		773,63	747,26
6ч 35 мин	250,15	6	236	226,7

0,3	842,46	120	65	20	49	2	0,8	0,1	4
0,1	81,42	115	49	20	65	20	5	0,29	5
0,1	746,26	118	65	20	65	8,4	2		
0,4	225,8	120	65	20	65				

Результаты испытания сушилки

Время работы	Влаж-ность, %		Температур-ный режим, °C			Высота слоя, мм		Гидравлическое сопротивление, мм вод.ст.	Производи-тельность		Расход газ-ов, кг/ч
	W _н	W _к	входящего воздуха	выходящего воздуха	в слое	плотный	кипящий		по сухому ма-териалу	по влаге	
8ч 45 мин	10	0,3	120	65	65	170	220	85	99,4	99,4	725
45 мин	12	0,1	115	49	49	165	215	98	108,6	13	697
						192	250	105			252
						170	220	90			252
7ч 40 мин	7,6	0,1	118	65	65	155	200	80	97,8	7,28	587,4
1ч 35 мин	7	0,1	120	65	65	146	190	77	151	10,5	856
	7,8	0,1				142	185	75			252
	8	0,15	116	50	50	140	180	85			252
7ч 30 мин	7,6	0,7	118	60	60	170	200	85	106,6	8	578,4
6ч	7,6	0,3	116	50	50	150	196	80	116,6	8,86	510
7ч 45 мин	7,8	0,2	117	52	52	160	210	85	103,5	8	478
						Полочные сушилки					
									22,5	2,5	1100
16ч	10	0,1	60	50							

Таблица 8

непрерывного действия

Расход тепла, ккал/ч	Количество высушен-ного материала, кг	Съем влаги		Удельный расход		Расход элек-троэнергии		Скорость сушки, %/мин	По-тери	КПД
		с единицы объе-ма, кг/м³.ч	с единицы сече-ния	газа, кг/кг влаги	тепла, ккал/кг влаги	кВт.ч/кг влаги	кВт.ч/кг сухой массы			
9 650	845	12,2	50,7	73	968	0,92	0,09	2,5	0,3	61,5
11 200	81,5	16,2	70	53,6	860	0,7	0,08	3		69,2
	815									
3 180	611	9	37	80,6	1 050	1,26	0,084	1,9	0,25	5,65
11 350	747	13	52	81,6	1 080	0,85	0,06	1,5	0	55
	240									
8 098	480	9,9	40,8	72,3	1012,3	1,15	0,086	1,9	0,1	58,6
8 200	800	11	45,2	57,6	926	1,04	0,08	1,9	0	64,4
7 500	700	9,9	40,8	59,7	937	1,15	0,088	1,95	0	63,5
	800									
2 662		0,033	0,089	400	1 065	0,68	0,075	0,015	1	

Результаты снятия материального баланса на

Время работы	Количество влажной массы, кг	W _н , %	Количество абсолютно сухого вещества во влажной массе	Количество выгруженной сухой массы
			кг	
8ч 45 мин	945,51	10	859,2	845
45 мин	98,35	12	87,8	81,5
7ч 35 мин	831,00	7,6	773,63	747,26
6ч 35 мин	250,15	6	236	226,7

Уманском витамин

W _к , %	Количество абсолютно сухого материала в сухом грануляте, кг	температура вхо-
0,3	842,46	120
0,1	81,42	115
0,1	746,26	118
0,4	225,8	120

Результаты испытания сушилки

Время работы	Влажность, %		Температурный режим, °C			Высота слоя, мм		Гидравлическое сопротивление, мм вод.ст.	Производительность		Расход газов, кг/ч
	W _н	W _к	входящего воздуха	выходящего воздуха	в слое	плотный	кипящий		по сухому материалу	по влаге	
8ч 45 мин	10	0,3	120	65	65	170	220	85	99,4	99,4	725
45 мин	12	0,1	115	49	49	165	215	98	108,6	13	697
7ч 40 мин	7,6	0,1	118	65	65	192	250	105			252
1ч 35 мин	7	0,1	120	65	65	170	220	90	97,8	7,28	252
	7,8	0,1				155	200	80	151	10,5	587,4
7ч 30 мин	8	0,15	116	50	50	146	190	77			856
6ч	7,6	0,7	118	60	60	142	185	75			252
7ч 45 мин	7,6	0,3	116	50	50	140	180	85	106,6	8	252
	7,8	0,2	117	52	52	170	200	85	116,6	8,86	578,4
16ч						150	196	80	103,5	8	510
218	10	0,1	60	50		160	210	85			478
						Полочные сушилки			22,5	2,5	1100

непрерывного действия

Расход тепла, ккал/ч	Количество высушенного материала, кг	Съем вла	
		с единицы объема, кг/м³.ч	с единицы сече-
9 650	845	12,2	50,
11 200	81,5	16,2	70
	815		
3 180	611		
11 350	747		
	226,7	9	37
	240	13	52
8 098	480		
8 200	800		
7 500	700	9,9	40,8
	800	11	45,2
		9,9	40,8
2 662			

Уманском витаминном заводе

Таблица 7

W _к , %	Количество абсолютно сухого материала в сухом грануляте, кг	Температурный режим сушки, °С				Остатки материала на разных операциях, %			Выход усадки на стационарный режим, мин
		температура входящего воздуха	температура выходящего воздуха	φ _н	φ _к	в циклоне	в бункере	потерь	
0,3	842,46	120	65	20	65	15	2	0,3	5
0,1	81,42	115	49	20	49	2	0,8	0,1	4
0,1	746,26	118	65	20	65	20	5	0,29	5
0,4	225,8	120	65	20	65	8,4	2		5

Таблица 8

непрерывного действия

Расход тепла, ккал/ч	Количество высушенного материала, кг	Съем влаги		Удельный расход		Расход электроэнергии		Скорость сушки, %/мин	Потери %	КПД
		с единицы объема, кг/м ³ ·ч	с единицы сечения	газа, кг/кг влаги	тепла, ккал/кг влаги	кВт·ч/кг влаги	кВт·ч/кг сухой массы			
9 650	845	12,2	50,7	73	968	0,92	0,09	2,5	0,3	61,5
11 200	81,5	16,2	70	53,6	860	0,7	0,08	3		69,2
	815									
	611									
3 180	747	9	37	80,6	1 050	1,26	0,084	1,9	0,25	5,65
11 350	226,7	13	52	81,6	1 080	0,85	0,06	1,5	0	55
	240									
	480		40,8	72,3	1012,3	1,15	0,086	1,9	0,1	58,6
8 098	800	9,9	45,2	57,6	926	1,04	0,08	1,9	0	64,4
8 200	700	11	40,8	59,7	937	1,15	0,088	1,95	0	63,5
7 500	800	9,9								
2 662		0,033	0,089	400	1 065	0,68	0,075	0,015	1	

Таблица 9

Определение возможности сушки химико-фармацевтических материалов в установках системы ИТМО

Основные характеристики	Класс материала			
	кристаллические		кристаллоколлоидные	
	с грануляцией	без грануляции	жесткая грануляция	мягкая грануляция
Энергия связи влаги с материалом $E, \text{Дж/моль} \cdot 10^{-5}$	0 — 8 для $W=5-0,02\%$		0 — 57 для $W=50-0,1\%$	0 — 57 для $W=5-0,1\%$
Массообменные характеристики $c_m \cdot 10^7$ $-\frac{d\mu}{dT} \cdot 10^{-5}$ $\delta \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$			0,03 — 44,3 0,1 — 0,66 0,1 — 0,79	
Формулы для расчета равновесной влажности	$W_p = A\varphi^b$ $A = 0,6-4$ $b = 0,08-9$		$W_p = Ae^{B\varphi}$ $A = 0,05-10$ $B = 1,5-3$ $W_p = A + B\varphi$ $W_p = A_1 + \frac{B_1}{1 + C_1\varphi}$ $A = 0,01-6$ $B = 0,01-1,5$ $B_1 = 0,1-400$ $C_1 = 0,5-600$	

Реологические характеристики:
коэффициент предельного напряжения сдвига: $R_{k_1} / 10^{-3}, \text{Н/м}^2$
 $R_{k_2} / 10^{-3}, \text{Н/м}^2$

34 — 42
165

88 — 166
34 — 113

59,8

Пластическая вязкость,
 $\eta^* \cdot 10^8 \text{ Па} \cdot \text{с}$
Допустимая температура теплоносителя (воздуха), $^{\circ}\text{C}$

На 5—8° ниже температуры плавления материала

На 10—12° ниже температуры

Реологические характеристики:
коэффициент предельного напряжения сдвига: $P_{k_1} / 10^{-3}, \text{Н/м}^2$
 $P_{k_2} / 10^{-3}, \text{Н/м}^2$

34 — 42

165

88 — 166

34 — 113

Пластическая вязкость,
 $\eta^* \cdot 10^8 \text{Па} \cdot \text{с}$

59,8

Допустимая температура теплоносителя (воздуха), °C

На 5—8° ниже температуры плавления материала

100 — 200

На 10—12° ниже температуры плавления материала

50 — 100

Оптимальная высота плотного слоя, мм

Аппаратурное оформление процесса

Сушилка СМК
II выпуска, матрица с $d_{\text{отв}}=2-3$ мм, одна удерживающая решетка с мелкой сеткой

Сушилка СМК
I выпуска, матрица с $d_{\text{отв}}=8-10$ мм для агрессивных материалов—фторопластовая. Одна удерживающая решетка с мелкой сеткой, расположенной сверху

Сушилка СМК
II выпуска, матрица с $d_{\text{отв}}=2$ мм. Работа с ножами

Сушилка СГК

Расчет конечного влагосодержания

Программа ARGEN,
затем программа АНИПР
или по формуле** $W_k = 44,72 \times$
 $\times W_n^{0,93} t_v^{-0,95} v_p^{-0,8} \frac{G}{F}^{-0,67}$

* Значения E даны без учета химически связанной влаги и для φ средней полосы Советского Союза 60 — 70%.

** W_n — начальное влагосодержание; t_v — температура входящего воздуха; v_p — массовая скорость; G/F — нагрузка на уддерживающую решетку.

Результаты испытания поточной линии ЛП-1 при отработке промышленного регламента на производство таблеток норсульфазола на Харьковском химико-фармацевтическом заводе «Здоровье трудящимся»

Вес контролируемой партии норсульфазола, кг	Влажность норсульфазола	Влажность крахмала	Приготовление крахмального клейстера					внешний вид	Смешение			
	%	%	расход крахмала, кг/ч	расход холодной воды, л/ч	расход горячей воды, л/ч	температура воды, °C	содержание крахмала, %		расход норсульфазола, кг/ч	расход крахмала, кг/ч	расход крахмального клейстера, л/ч	влажность массы после смешения, %
400	0,8	12,5	3,8	7,8	37,2	95	7,8	Прозрачный без комков »	108—110	3,1	38	23—24,5 22,5
400	0,8	12,5	3,8	7,8	37,2	95	7,8		108—112	3,1	38	
400	0,8	12,5	3,8	7,8	37,2	96	7,8		106—108	3,1	38	
560	0,8	13	3,8	7,8	38	95	7,8	»	110—115	3,1	38	19—20
							7,8	»	104—102,5	3,1	38	24
300	0,2	13	3,8	7,8	38	95—96	7,0	»	92,7	—	28	17,8—19 24,5—25
400	0,8	13	3,8	7,8	38	95—96	7,0		92,7	—	36	
320	0,3	12	3,8	7,8	38	95—96	7,0	»	92,7	—	35	21,5—23,5

0,18	4	3,8	6,6	36,8	95
0,18	3,8	3,8	6,6	37	95
0,31	3,9	3,8	6,6	37	95
—	4	3,8	6,6	37	95
0,18	3,8	3,8	6,6	37	96

»
»
»
»
»98
93
983,1
3,1
3,1
3,136
34
36
3622,08
22
22,3
22

0,18	4	3,8	6,6	36,8	95	»	98	3,1	36	22,08
0,18	3,8	3,8	6,6	37	95	»	93	3,1	34	22
0,31	3,9	3,8	6,6	37	95	»	98	3,1	36	22,3
—	4	3,8	6,6	37	95	»	98	3,1	36	22
0,18	3,8	3,8	6,6	37	96	»		3,1	2,6	22,3

Сушка

режимные параметры

диаметр отверстий в решетке гра- нулятора, мм	температура входящего воздуха, °C	температура материала в слое, °C	температура воздуха на выходе из сушилки, °C	высота слоя, мм	скорость сушильного агента, м/с	влажность сухого гра- нулята, %	фракционный состав сухого гранулята, %
2	130	80	50	300	1	1	
2	130	80	45—54	300	1,2	0,85—1	
2	130	75—80	45—50	300	1	1	2 мм—14,07 1—40,74 0,5 —9,26 0,25—7,41 <0,25—28,52
2	130	104	65—68	300	1,3	0,4—1	2 мм—11,94 1—41,79 0,5 —3,74 0,25—7,46 <0,25—35,07
2	100—110	50—60	40—50	370	1,3	0,5	2 мм—8,25 1—38,93 0,5 —4,37 0,25—12,37 <0,25—36,08
2	110—130	70—88	55—66	250	1,3	1,2	
2	130—144	100—120	56—64	300	1,3	1	2 мм—10 1—49 0,5—4 0,25—8 <0,25—29

Сушка							
режимные параметры							
диаметр отверстий в решетке гранулятора, мм	температура входящего воздуха, °C	температура материала в слое, °C	температура воздуха на выходе из сушилки, °C	высота слоя, мм	скорость сушильного агента, м/с	влажность сухого гранулята, %	фракционный состав сухого гранулята, %
2	120—135	70—80	50—56	350	1,3	1	<2мм—8,5 1—39,3 0,5—4,5 0,25—8 <0,25—33,7
2	140	90	60	200	1,2	0,48	
2	145	70—80	40—50	300	1,2	0,5	
2	140	80—90	40—50	350	1,2	0,4	
2	180	70	40	250	1,0	0,45	
2	138	70—80	55	300	1,2	0,45	

Опудривание							Кол-во материала в циклоне, кг	Остаток влажной массы в смесителе (после чистки), кг
расход сухого гранулята, кг/ч	расход талька, кг/ч	расход стеариновой кислоты, кг/ч	расход крахмала, кг/ч	влагосодержа- ние крахмала, %	влажность опудренного гранулята, %	кол-во опудренного гранулята, кг		
	2,65	0,5	5,4	12,5	1,8	350	4	—
	2,65	0,5	5,4	12,5	—	—	—	—
	2,65	0,5	5,4	13	1,8—2	245,5	5,7	1,0
	2,65	0,5	5,4	5,5—13	1,5	475	1	1,1

2,65

0,5

5,4

7,2

1,8

187,95

4,7

1,1

—

1,1
1,116,1
16,13,2
4,6—7,52,38—2,7
1,7—2,3362,3
503,5

4,7

1,1

—

1,1

16,3

6

2

384,2

	2,65	0,5	5,4	7,2	1,8	187,95	4,7	1,1
	—	1,1	16,1	3,2	2,38—2,7	362,3	4,7	1,1
	—	1,1	16,1	4,6—7,5	1,7—2,3	503,5		
	—	1,1	16,3	6	2	384,2		
80—100	2,6	0,5	2,1	4,0	2	266	4,5	1,0
95—100	2,6	0,5	2,1	3,8		277	4	1,0
90—95	2,6	0,5	2,1	3,9		—	4	1,0
90—100	2,6	0,6	2,1	4			4	1,0
98—100	2,6	0,5	2,1	3,8			4	1,0

Остаток влажной массы в грануляторе (после чистки), кг	Потери, %	Качество таблеток			
		средний вес, г	распадаемость, мин	прочность, кг/м ²	процентное содержание норсульфазола
—	—	—	—	—	—
3,0	0,17	0,55 0,55	12—9 9	8 8—10	0,493—0,484 0,488

Продолжение табл. 10

Остаток влажной массы в грануляторе (после чистки), кг	Потери, %	Качество таблеток			
		средний вес, г	распадаемость, мин	прочность, кг/м ²	процентное содержание норсульфазола
4,7	0,3	0,55	10,2	5—11 6—10	0,485 0,5
2,5	0,4	0,55	8—8,5	8—10	0,485—0,5
1,5	0,17	0,55 0,55	0,30—0,40 5	5,5 6—7	0,485 0,491
			5	7	0,489
1,0	0,3	0,55		5	0,497
1,0	0,3	0,551	7	7	0,498
1,0	0,3	0,551	7	7	0,476
1,0	0,3	0,55	7	4	0,482
1,0	0,4	0,55	9—10	8—10	0,494

ИНСТРУКЦИЯ

Исходные
1-я карта

2-я карта

Fig. 4 В следую

3-я карта
Ф9.4 в следую

4-я карта
порядке:

5-я карта

*
 *
 *
 *

10

20

30

40

50

15*

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

ИНСТРУКЦИЯ ПО ПЕРФОРАЦИИ ПРОГРАММЫ ARGEN

Исходные данные готовятся на 80-колодных ПК

1-я карта

*** НБ ↑ FF — 0000000000,

2-я карта содержит семь значений входных данных в формате F9.4 в следующем порядке:

$H - \lambda, l_r, \rho_m, \rho_r, v, d,$

3-я карта содержит семь значений входных данных в формате F9.4 в следующем порядке:

$T_{вх.г}, T_m, v, W_n, G, C_m, C_r,$

4-я карта содержит два значения входных данных в следующем порядке:

$f_{эф}, h_{част},$

5-я карта

*** КБ ↑ FFF — 000000000.

C ***** ПРОГРАММА ARGEN
 READ (1, 10)H, TL, SL, RO, ROR, UN, SD, T, TM, V,
 W, G, CM, CR, F3, H1
 10 FORMAT (7F9.4)
 WRITE (3,20) H, TL, SL, RO,
 20 FORMAT (5X, 2HR=, F9.4, 1HM, 5X, 7HLAMBDA=, F9.4,
 15HKKA/N*ч. град
 * 5X, 2HL=, F9.4, 1HM, 5X, 4HROR=, F9.4, 8HKГ/КУБ,М)
 WRITE (3,30) ROR, UN, SD,1
 30 FORMAT (5X, 4HRO4=, F9.4, 8HKГ/КУБ, М, 5X,
 3HH1=, F9.4, 8HKГ/М*С,
 * 5X, 2HD=, F9.4, 1HM, 5X, 4HTBX=, F9.4, 4HГРАД)
 WRITE (3,40) TM, V, W, G
 40 FORMAT (5X, 3HTM=, F9.4, 4HГРАД, 5X, 2HV=, F9.4,
 5HM/CEK, 5X,
 * 3HWH, F9.4, 5HKГ/КГ, 5X, 2HG=, F9.4, 6HKГ/ЧАС)
 WRITE (3,50) CM, CR, F3, H1
 50 FORMAT (5X, 3HCM=, F9.4, 12HKКАЛ/КГ*ГРАД, 5X,
 3HCR=, F9.4.
 * 12HKКАЛ/КГ*, ГРАД
 * 5X, 4HFЭФ=, F9.4 7HKВ.М/КГ, 5X, 3HH1=, F9.4, 1HM)
 SL=1000*SL
 H1=1000*H1
 П=3.14


```

F2=2/3
F1=((П*SL**2*H1)/4**F2
IF (F1) 60, 70, 80
60  FORMAT (34H подкоренное выражение отрицательно)
    RETURN
70  FORMAT (1X, 29H подкоренное выражение равно нулю)
    RETURN
80  CONTINUE
    F3=0.207*П*SL*H1/F1
    FAKT=SQRT (F3)
    GL=9.81
    AR=10**3*SL**3*RO*G1/(UN**2*ROR)
    AR=FAKT*AR
    SL=SL/1000
    H1=H1/1000
    WRITE (3,90) AR
90  FORMAT (10X, 3HAR=, F12.2)
    AR1=SQRT (AR)
    AR2=18+0.61*AR1
    RE=AR/AR2
    WRITE (3, 100) RE
100 FORMAT (10X, 3HRE=, F9.4)
    АЛЬФА=TL/SL*0.2*RE**0.8
    WRITE (3, 110) АЛЬФА
110 FORMAT (10X, 6H АЛЬФА=, F9.4, 18HККАЛ/КВ.М*Ч*
    ГРАД)
    ЭЛ=RE**3/AR
    WRITE (3, 120)
120 FORMAT (10X, 2HL=, F9.4)
    ЭЛ=ЭЛ/1000
    G1=G1/1000
    U1=ЭЛ*UN*RO*G1/ROR
    GT=0.33
    U=U1**CT
    V=V1+U
    G1=G1*1000
    WRITE (3,130) U
130 FORMAT (10X, 2HU=, F9.4)
    ПК1=SK*12./100.
    ПК2=SK*5./100.
    WRITE (3, 140) SK, LK1, ПК2
    WRITE (3, 300)
140 FORMAT (2X, 46H наиболее вероятный коэффициент
    потери влаги K=)
    * 1H (,F4.1, 3H+, F5.2.2H/—, F5.2, 4H) O/O)
    DW=SK*W/(100*)
    DW=D/100
    J=0
    J1=100*H+3
    WRITE (3,200)
    WRITE (3,300)
    WRITE (3,300)

```

200

190

150

160

300

170

180

FOR
ВЫС
*
IF
RE
HH
HH2
HH3
HH
WI
W2
W3
W4
WR
WR
FOR
WR
FOR
FOR
J=J
GO
RET
END

Инс

Массив пер
1-я карта

2-я карта

и — скорос

с_м — теплос

с_г — теплос

ρ_г — удельн

T_м — темпер

ΔT — | T_м

K — коэфф

T_о — темпер

ω_н — начал

G — произ

ρ_м — удельн

d_ч — характ

Карта должна и

3-карта

l — характ

λ — теплоп

d — диамет

f — эффект

v — кинема

Карта должна и


```

200  FORMAT (5X, 57H  распределение влагосодержания по
      *  высоте сушильной колонны)
190  1F (J—J1) 160, 150, 150
150  RETURN
160  HH1=H—0.01*J
      HH2=H—0.01*(J+1)
      HH3=H—0.01*(J+2)
      HH4=H—0.01*(J+3)
      W1=W—J*01
      W2=W—(J+1)*DW
      W3=W—(J+2)*DW
      W4=W—(J+3)*DW
      WRITE (3, 170) HH1, HH2, HH3, HH4
      WRITE (3, 180) W1, W2, W3, W4
300  FORMAT (3X)
      WRITE (3, 300)
170  FORMAT (5X, 4 (2HH-, F9.2, 1HH, 10X))
180  FORMAT (5X, 4 (2HW-, F9.5, 11X))
      J=J+4
      GO TO 190
      RETURN
      END

```

Инструкция по перфорации программы CHARL

Массив перфорируется на трех картах:

1-я карта

*** НБ ↑ FFF — 000000000000000000000000,

2-я карта

u — скорость газа F 6.3
 c_m — теплоемкость материала F 6.3
 c_g — теплоемкость газа F 6.3
 ρ_g — удельная плотность газа F 6.3
 T_m — температура материала F 7.3
 ΔT — $|T_m - T_k|$ F 7.3
 K — коэффициент удаленной влаги F 5.2
 T_0 — температура входящего газа F 7.2
 ω_n — начальная влажность материала F 7.4
 G — производительность F 8.3
 ρ_m — удельная плотность материала F 7.2
 $d_{\text{ч}}$ — характерный размер частицы F 6.3

Карта должна иметь 78 пробивок,

3-карта

l — характерный размер частиц F 6.3
 λ — теплопроводность F 7.4
 d — диаметр вертикальной части сушилки F 5.2
 f — эффективная площадь F 5.2
 ν — кинематическая вязкость газа F 6.2

Карта должна иметь 29 пробивок.

Формат FMN определяет, что число содержит M знаков, включая точку, из них N —после точки. Незначащие нули можно заменить символом — (пробел).

ПОЯСНЕНИЕ К ПРОГРАММЕ АНИПР

Исходные данные программы перфорируются одной группой в десятичной системе счисления (10 с/с) с кодовой запятой по столбцам в следующем порядке:

а) результативный показатель (функция)

$$G_y (i = 1, 2, \dots, n),$$

б) факторные показатели (аргументы)

$$x_{ji} (j = 1, 2, \dots, m).$$

Количество рассматриваемых показателей $(m+1)$, число значений каждого показателя (N) заносятся соответственно в ячейки 0030, 0031 в десятичной системе счисления как целые числа.

Перед работой программы ячейки 17 500—17 777 должны быть очищены.

На печать выдаются результаты по трем моделям:

1) линейная модель вида:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_n x_n.$$

Для каждого признака печатаются характеристики: номер признака в 10 с/с как целое число; \bar{x} — среднее арифметическое фактора в 10 с/с с плавающей запятой; σ — среднее квадратическое отклонение в 10 с/с с плавающей запятой.

Группы этих характеристик разделяются между собой интервалами. В конце последней группы печатается пунктирная линия.

Далее следуют коэффициенты парной зависимости, их средние квадратические ошибки и достоверности в 10 с/с с плавающей запятой в следующем порядке:

$$r_{12} \sigma_{r_{12}} \mu_{r_{12}} b_1 b_1 \sigma_{b_1} \mu_{b_1} b_0,$$

$$r_{13} \sigma_{r_{13}} \mu_{r_{13}} b_1 \sigma_{b_1} \mu_{b_1}, b_0,$$

$$r_{1m} \sigma_{r_{1m}} \mu_{r_{1m}} b_1 \sigma_{b_1} \mu_{b_1} b_0.$$

Таких групп будет c_m^2 , т. е. столько, сколько различных коэффициентов парных корреляций. Группы разделяются интервалами, в конце последней печатается пунктирная линия.

При включенном ключе № 6 печатается матрица коэффициентов парных корреляций в 10 с/с с плавающей запятой по строкам:

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mm} \end{bmatrix}$$

Строки разделяются
 r_{ij} печатаются в 10

$r_{12}, r_{13}, \dots, r_{1m}$
печатаются пунктирным

Коэффициенты
квадратическ
и его достовер
через интервал в сл

Коэффициенты
и достоверности печ
щем порядке:

$$b_0, b_1, \sigma_{b_1}$$

— отделяются от пр
ями. Далее печатают

зателя \hat{y}_i в 10с/с с п

Две пунктирные

Статистические х

вающей запятой печа

σg — среднее к

η — корреляц

F — фактичес

ϵ — средняя

$$\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ — су}$$

S — остаточна

Пунктирная лини

r_a — коэффици

D — фактичес

y — коэффици

\hat{e} — среднеква

Три пунктирные л

Модель вида $y =$

в 10 с/с с плавающей

10 с/с как целое числ

ющей запятой.

Статистические х

(в том же порядке, что

Три пунктирные лини

Степенная модель вида

Результаты печатаются

модели.

Три пунктирные лини

$\epsilon_1, \epsilon_2, \dots$

второй

Строки разделяются интервалами. Частные коэффициенты корреляций r_{ij} печатаются в 10 с/с с плавающей запятой в следующем порядке: $r'_{12}, r'_{13}, \dots, r'_{1m}, r'_{23}, r'_{24}, \dots, r'_{2m}, r'_{34}, \dots, r'_{m-1,m}$ и отделяются пунктирными линиями.

Коэффициенты детерминации, множественной корреляции, средняя квадратическая ошибка коэффициента множественной корреляции и его достоверность печатаются в 10 с/с с плавающей запятой через интервал в следующем порядке:

$$R^2, R_1, \sigma_R, \mu_R.$$

Коэффициенты уравнения множественной регрессии, их ошибки и достоверности печатаются в 10 с/с с плавающей запятой в следующем порядке:

$$b_0, b_1, \sigma_b, \mu_{b_1}, b_2, \sigma_{b_2}, \mu_{b_2}, \dots, b_{m-1}, \mu_{b_{m-1}},$$

— отделяются от предыдущих результатов двумя пунктирными линиями. Далее печатаются выравненные значения результативного показателя \hat{y}_i в 10 с/с с плавающей запятой.

Две пунктирные линии.

Статистические характеристики линейной модели в 10 с/с с плавающей запятой печатаются в следующем порядке:

σg — среднее квадратическое отклонение выравненного ряда;

η — корреляционное отклонение;

F — фактическое значение F -критерия;

ϵ — средняя линейная ошибка аппроксимации;

$$\sum_{i=1}^{i=n} (y_i - \hat{y}_i)^2 \text{ — сумма квадратов отклонений;}$$

S — остаточная дисперсия.

Пунктирная линия:

r_a — коэффициент автокорреляции;

D — фактическое значение критерия Дарбина—Уотсона;

y — коэффициент вариации выравненного ряда;

$\hat{\epsilon}$ — среднеквадратическая ошибка аппроксимации.

Три пунктирные линии.

Модель вида $y = a_0 f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_m(x_m)$, a_0 — свободный член в 10 с/с с плавающей запятой. Номер выбранной функции $f_i(x_i)$ в 10 с/с как целое число и параметры этой функции в 10 с/с с плавающей запятой.

Статистические характеристики в 10 с/с с плавающей запятой (в том же порядке, что и в линейной модели).

Три пунктирные линии:

Степенная модель вида

$$y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m}.$$

Результаты печатаются в том же порядке, что и в случае линейной модели.

Три пунктирные линии:

$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ — средние линейные ошибки аппроксимации для первой, второй, третьей моделей вида в 10 с/с с плавающей запятой.

Ограничения:

исходные данные должны удовлетворять следующим условиям:

$$M(2M + N + 2) - 2 \leq 3904,$$

$$N \leq 234,$$

$$y_i > 0, \quad x_i > 0, \quad x_i \neq 1.$$

Алгоритм.

С помощью данной программы можно построить, проанализировать следующие многофакторные модели:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + \dots + b_m x_m,$$

$$y = a_0 f_1(x_1) \cdot f_2(x_2) \dots f_m(x_m),$$

$$y = b_0 x_1^{b_1} \cdot x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m}.$$

Параметры этой модели находятся с помощью метода наименьших квадратов. Все перечисленные характеристики рассчитываются по известным формулам.

Модель вида

$$y = a_0 f_1(x_1) \dots f_m(x_m).$$

Параметры функции $f_i(x_i)$ рассчитываются по методу, описанному Д. Бранданом [132].

Сначала y заменяется его нормализованным значением y_0 , определяемым как $y_0 = \frac{y}{\bar{y}}$, где \bar{y} — средняя арифметическая.

Затем определяется функция $f_1(x_1)$, отражающая зависимость между y_0 и x_1 , и для каждого наблюдения рассчитывается условный показатель

$$\hat{y} = \frac{\hat{y}_1}{f_2(x_2)} = \frac{y}{\bar{y} f_1(x_1) f_2(x_2)} = f_3(x_3) \dots f_m(x_m).$$

Этот результат уже не будет зависеть от изменения x_1 , а определяется только величинами x_2, \dots, x_m .

После этого определяется зависимость условного показателя \hat{y} от x_2 находится функция $f_2(x_2)$ и рассчитывается новый условный показатель:

$$\hat{y}_2 = \frac{\hat{y}_1}{f_2(x_2)} = \frac{y}{\bar{y} f_1(x_1) f_2(x_2)} = f_3(x_3) \dots f_m(x_m).$$

Такой расчет будет производиться до тех пор, пока не будут получены значения всех $f_i(x_i)$. Модель можно представить как произведение найденных функций

$$\hat{y} = a_0 f_1(x_1) f_2(x_2) \dots f_m(x_m),$$

где $a_0 = \bar{y}$.

Параметры функций $f_i(x_i)$ вычисляются с помощью метода наименьших квадратов. При этом рассматриваются следующие функции:

Критерием
нейной ошибки
Для данно
ров в соответс
тативный показ
Степенная моде
путем логарифм

$\ln y =$

$$y = a + bx, \quad y = a + \frac{b}{x}, \quad y = a + bx^2,$$

$$y = ab^x, \quad y = ax^b, \quad y = a + bx + cx^2.$$

Критерием для выбора функции служит коэффициент средней линейной ошибки аппроксимации (ϵ).

Для данного метода существенным является расположение факторов в соответствии со степенью влияния каждого из них на результативный показатель, а также независимость факторов между собой.

Степенная модель вида $y = b_0 x_1^{b_1} x_2^{b_2} \dots x_m^{b_m}$ сводится к линейной путем логарифмирования:

$$\ln y = \ln b_0 + b_1 \ln x_1 + b_2 \ln x_2 + \dots + b_n \ln x_m.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А. В. Теория сушки. М., «Энергия», 1968.
2. Гинзбург А. С., Дущенко В. П., Никитина Л. М. Тепло- и массоперенос, т. 10, ч. II. Мн., ИТМО АН БССР, 1974.
3. Натрадзе А. Г. Очерк развития химико-фармацевтической промышленности СССР. М., Медиздат, 1977.
4. Сушка (реферативный материал отечественной и зарубежной литературы с 1968 по 1970 гг.). М., 1972.
5. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка в кипящем слое. М.—Л., «Химия», 1964.
6. Гандель В. Г. Пути совершенствования производства таблеток. Труды первого Всесоюзного съезда фармацевтов. М., «Вільна Україна», 1970.
7. J. Pharm. Sci, vol. 53, № 3, p. 314, 1964.
8. J. Pharm. Sci, vol. 53, № 3, p. 320, 1964.
9. Contini S., Atasoy K. Pharm. Ind. vol. 23, № 3, 1966.
10. Гельперин Н. И. и др. Исследование процесса сушки тетрациклина во взвешенном состоянии. «Медицинская промышленность СССР», № 9, 1962.
11. Юдицкий В. И. Исследование технологии и аппаратное оформление сушки кристаллических медицинских препаратов в пульсирующем слое. Автореферат канд. дис. Мн., 1973.
12. Забродский С. С. и др. Сушка тетрациклина в пульсирующем слое. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1967.
13. Барашков С. Г. Применение аэрофонтанных сушилок для сушки химико-фармацевтических продуктов. «Медицинская промышленность СССР», № 11, 1966.
14. Голубев Л. Г., Николаев А. М. Сушка препаратов кальцекса и ПАСК в аппарате с фонтанирующим слоем. «Медицинская промышленность СССР», № 2, 1964.
15. Голубев Л. Г. и др. Исследование сушки пенициллина в аэрофонтанной сушильной установке. «Химико-фармацевтический журнал», № 12, 1968.
16. Сажин Б. С., Фокин И. Ф., Скурский А. В. Новые вы-

- сокоэффективные с образных материал
1964.
17. Сажин Б. Шенном слое. М., 1964.
 18. Комплексна мико-фармацевтич союзнай конференци
 19. Барашков сушки химико-фарм ленность СССР», №
 20. Гельперин риалов в аппаратах состоянии (обзор ли № 2, 1969.
 21. Кондрать мина В₁) во взвешен нал», № 11, 1969.
 22. Соколовс гидрата диацетон-2- «Химико-фармацевти
 23. Репринце пективности методов тов. «Вопросы сушки кова АН БССР, 1976.
 24. Шевцов В. дование эффективнос «Химико-фармацевти
 25. Мельвин-Х
 26. Киреев В. издат, 1963.
 27. Репринце ные методы сушки кр В сб. «Тепло- и массо
 28. Шубин Г. С. древесины. М., «Лесна
 29. Никитина фициенты массоперен 1968.
 30. Романков Массообменные проце
 31. Урьев Н. Б. дисперсных систем. М.,

сокоэффективные сушилки с взвешенным слоем для сыпучих и пастообразных материалов. «Медицинская промышленность СССР», № 9, 1964.

17. С а ж и н Б. С. Современное состояние техники сушки во взвешенном слое. М., НИИХИММАШ, 1966.

18. Комплексная механизация и автоматизация процессов в химико-фармацевтической промышленности. Тезисы докладов I Всесоюзной конференции, ч. I. ЦБНТИ. М., 1971.

19. Б а р а ш к о в С. Г. Применение аэрофонтанных сушилок для сушки химико-фармацевтических продуктов. «Медицинская промышленность СССР», № 11, 1966.

20. Г е л ь п е р и н Н. И., Ф и л о р и к ь я н Д. Ф. Сушка материалов в аппаратах с псевдоожиженным слоем и во взвешенном состоянии (обзор литературы). «Химико-фармацевтический журнал», № 2, 1969.

21. К о н д р а т ь е в а Н. М. и др. Сушка тиамин-бромиды (витамина В₁) во взвешенном состоянии. «Химико-фармацевтический журнал», № 11, 1969.

22. С о к о л о в с к и й А. А. и др. Исследование процесса сушки гидрата диацетон-2-кето-*l*-гулоновой кислоты в вихревой сушилке. «Химико-фармацевтический журнал», № 12, 1974.

23. Р е п р и н ц е в а С. М. Некоторые вопросы определения перспективности методов сушки таблетлируемых лекарственных препаратов. «Вопросы сушки и термообработки». Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1976.

24. Ш е в ц о в В. В., А л е к с е е в А. Д., Р е д е к о в В. И. Исследование эффективности работы сушилок виброаэрокипящего слоя. «Химико-фармацевтический журнал», № 2, 1976.

25. М е л ь в и н-Х ь ю з. Физическая химия. М., ИЛ, 1962.

26. К и р е е в В. А. Краткий курс физической химии. М., Госхимиздат, 1963.

27. Р е п р и н ц е в а С. М., Ф е д о р о в и ч Н. В. Комбинированные методы сушки кристаллоколлоидных и кристаллических веществ. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 6. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.

28. Ш у б и н Г. С. Физические основы и расчет процессов сушки древесины. М., «Лесная промышленность», 1973.

29. Н и к и т и н а Л. М. Термодинамические параметры и коэффициенты массопереноса во влажных материалах. М., «Энергия», 1968.

30. Р о м а н к о в П. Г., Р а ш к о в с к а я Н. Б., Ф р о л о в В. Ф. Массообменные процессы химической технологии. Л., «Химия», 1975.

31. У р ь е в Н. Б. Физико-химическая механика в технологии дисперсных систем. М., «Знание», 1975.

32. Ребиндер П. А. Физико-химическая механика — новая область науки. М., «Знание», 1958.
33. Ребиндер П. А., Михайлов Н. В. Научные основы технологии производства новых материалов. Вестник АН БССР, № 10, 1961.
34. Урьев Н. Б., Ребиндер П. А. Основные стадии образования и разрушения коагуляционных структур и их роль в оптимизации технологических процессов в структурированных дисперсных системах. ДАН СССР, № 5, 205, 1972.
35. Белгородский М. Н., Голубев Л. Г., Чухлебов К. С. Экспериментальные исследования структурно-механических и теплофизических характеристик некоторых лекарственных препаратов. «Химико-фармацевтический журнал», № 12, 1971.
36. Андреев С. Е., Говаров В. В., Петров В. А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М., Металлургиздат, 1959.
37. Езерский М. Л. Методы определения физико-химических характеристик фармацевтических порошков. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1976.
38. Шевчук А. П. и др. Экспериментальное исследование структурно-механических свойств порошков некоторых лекарственных веществ. «Химико-фармацевтический журнал», № 5, 1976.
39. Езерский М. Л., Пневменная Г. М., Солдатова С. П. О промышленном контроле дисперсности порошков антибиотиков. «Химико-фармацевтический журнал», № 10, 1973.
40. Белоусов В. А., Кальман-Иванов Э. Э., Поддубная Н. П. Влияние на насыпной вес и текучесть порошков их гранулометрического состава. «Химико-фармацевтический журнал», № 2, 1972.
41. Езерский М. Л., Солдатова Г. П., Фишман В. М. К вопросу об измерении дисперсности порошка тетрациклина. «Химико-фармацевтический журнал», № 1, 1974.
42. Ходаков Г. С. Основные методы дисперсионного анализа порошков. М., Стройиздат, 1968.
43. Городничев В. И., Егорова В. И., Борисов Г. Н. Определение форм связи влаги в лекарственных гранулятах. «Химико-фармацевтический журнал», № 7, 1972.
44. Городничев В. И., Борисов Г. Н., Егорова В. И. Теплофизические характеристики лекарственных средств и гранулятов. «Химико-фармацевтический журнал», № 11, 1971.
45. Барашков С. Г., Харитонов Г. П., Лизунова Т. И. Теплофизические характеристики некоторых химико-фармацевтических препаратов. «Химико-фармацевтический журнал», № 8, 1975.

46. Голубев Л. Г. Характеристика фармацевтических порошков. М., Стройиздат, 1976.
47. Дубинин М. С. Техника. М., Стройиздат, 1976.
48. Келлер М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
49. Филатов М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
50. Чупин М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
51. Макаров М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
52. Казаков М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
53. Казаков М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
54. Казаков М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
55. Рауль М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
56. Брун М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
57. Основы М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
58. Де-Бур М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
59. Кара М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
60. Липа М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
61. Блох М. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
62. Leger M. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
63. Leger M. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.
64. Leger M. Я. Материаловедение. М., Стройиздат, 1976.

46. Голубев Л. Г., Кац В. Я. Исследование реологических характеристик некоторых фармацевтических препаратов. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1975.

47. Дубинин М. М. Физико-химические основы сорбционной техники. М., ОНТИ, 1935.

48. Кельцев Н. В. Основы адсорбционной техники. М., «Химия», 1976.

49. Филоненко Г. К. и др. Сушка пищевых растительных материалов. М., «Пищевая промышленность», 1971.

50. Чуприна А. И. Исследование равновесной влажности и массообменных характеристик некоторых пищевых продуктов. Автореферат канд. дис., 1968.

51. Мак-Бэн Дж. В. Сорбция газов и паров твердыми телами. М., Госхимиздат, 1934.

52. Казанский М. Ф. Термограммы сушки капиллярно-пористых тел с разнородносвязанной влагой. МТИПП. Под ред. А. В. Лыкова. Вып. 8, 1957.

53. Казанский М. Ф. Визначення адсорбованої вологи силікагелю з температурних кривих сушіння тонких зразків. Наукові записки, КДПІ, XIX, 1956.

54. Казанский М. Ф. Исследование кинетики тепло- и массообмена капиллярно-пористых материалов в процессе сушки. Автореферат докт. дис. Мн., 1958.

55. Paulik F., Paulik J., Erdey L. Zeit, für analyt Chem., H. 4, 160, 1958.

56. Брунауэр. Адсорбция газов и паров. М., ИЛ, 1948.

57. Основные проблемы физической адсорбции. Труды I Всесоюзной конференции по теоретическим вопросам адсорбции. М., «Наука», 1970.

58. Де-Буре. Динамический характер адсорбции. М., ИЛ, 1962.

59. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. М., Госхимиздат, 1953.

60. Липатов С. М. Высокомолекулярные соединения (лиофильные коллоиды). Мн., АН БССР, 1941.

61. Блох А. С. Основные графические методы обработки опытных данных. М., Машгиз, 1953.

62. Leroy R. Une methode correcte de dosage de l'eau Chimie Analytique, Novembre, 1954.

63. Leroy R. Les laux incluses et l'humidite Industries agricoles et alimentaires nos, № 7, 9, 1948.

64. Leroy R. Mesure de l'humidite l'Anankimetric — Les diagrammes hurographiques isanankes, aplications an caleul des sechoirs Belletin de la Societe Francaise de Germigue, 1959.

65. Кавказов Ю. А. Взаимодействие кожи с влагой. М., Гиз-легпром, 1952.
66. Максимов Г. А. Сушка влажных материалов в электрическом поле высокой частоты. Всесоюзное научно-техническое совещание по интенсификации процессов и улучшению качества материалов при сушке в основных отраслях промышленности и сельском хозяйстве. Энергетическая секция. М., «Промиздат», 1958.
67. Ничипоренко С. П. Физико-химическая механика структур в технологии строительной керамики. Киев, «Наукова думка», 1967.
68. Ничипоренко С. П., Абрамович М. Д., Комская М. С. О формировании керамических масс в ленточных прессах. Киев, «Наукова думка», 1971.
69. Панасевич А. А. и др. Материалы Всесоюзной конференции по физико-химической механике. Уфа, 1971.
70. Борзунов Е. Е., Круглицкий Н. Н. Материалы Всесоюзной конференции по физико-химической механике. Уфа, 1971.
71. Богуславский А. Ш., Минченко В. В. В сб. «Поверхностные явления в дисперсных системах», вып. 3. Киев, «Наукова думка», 1974.
72. Шанин Н. П., Алексеев А. С., Болотовский М. Д. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Механика сыпучих материалов». Одесса, 1975.
73. Лиштван И. И., Терентьев А. А. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции «Механика сыпучих материалов». Одесса, 1975.
74. Месчан С. Р. Механические свойства грунтов и лабораторные методы их определения. М., «Недра», 1974.
75. Месчан С. Р. Ползучесть глинистых грунтов. Ереван, изд-во «Недра», 1967.
76. Ломизе Г. М., Гудкин А. М., Жуков В. Н. Реологические свойства пластичных глин. Основания, фундаменты и механика грунтов, № 2, 1, 1963.
77. Михайлов Н. В., Ребиндер П. А. «Коллоидный журнал», № 17, вып. 2, 1957.
78. Габец П. С. и др. Определение теплофизических свойств химико-фармацевтических препаратов и их зависимость от температуры. «Химико-фармацевтический журнал», № 10, 1975.
79. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М., «Высшая школа», 1967.
80. Шашков А. Г. и др. Методы определения теплопроводности и температуропроводности. Под ред. А. В. Лыкова. М., «Энергия», 1973.

81. Репр...
- и сушки поро...
82. Репр...
- кристаллически...
- СССР, № 57853...
83. Федор...
- слабозапыленнь...
- 1967.
84. Репр...
- персных систем...
- АН БССР, 1969.
85. Репр...
- обмен дисперсн...
- интенсификации...
- процессах». Мн.,
86. Репр...
- Радиационный п...
- сушильно-термич...
- сушильно-терми...
- БССР, 1975.
87. Репр...
- использования в...
- риалов. В сб. «Т...
- 1969.
88. Любош...
- ционном теплооб...
89. Репр...
- топлива в падаю...
- Института энерге...
90. Репр...
- теплообмена дис...
- АН БССР, сер. ф...
91. Репр...
- переноса радиаци...
- и массообмен в с...
- АН БССР, 1971.
92. Репр...
- и массоперенос»,
93. Романк...
- шенном состоянии
94. Иванов...
- Исследование вла...
- кристал...
- ких м...

81. Репринцева С. М. и др. Устройство для гранулирования и сушки порошков. Авторское свидетельство СССР, № 350513, 1972.

82. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Сушилка для кристаллических дисперсных материалов. Авторское свидетельство СССР, № 578538, 1977.

83. Федорович Н. В. Исследование лучистого теплообмена слабозапыленных дисперсных потоков. Автореферат канд. дис. Мн., 1967.

84. Репринцева С. М. Радиационный перенос энергии в дисперсных системах. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 11. Мн., ИТМО АН БССР, 1969.

85. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Лучистый теплообмен дисперсных свободнопадающих материалов. В сб. «Вопросы интенсификации переноса тепла и массы в сушильных и термических процессах». Мн., «Наука и техника», 1967.

86. Репринцева С. М., Федорович Н. В., Драгун В. Л. Радиационный перенос в дисперсных системах и его применение для сушильно-термических процессов. В сб. «Теплофизика и технология сушильно-термических процессов». Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1975.

87. Репринцева С. М. Перспективы и рациональные области использования высокотемпературной и радиационной сушки материалов. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 11. Мн., ИТМО АН БССР, 1969.

88. Любошиц И. Л. Нагрев дисперсного материала в радиационном теплообменнике. ИФЖ, № 1, 1961.

89. Репринцева С. М. К расчету прогрева мелкодисперсного топлива в падающем слое в поверхностном теплообменнике. Труды Института энергетики, вып. IV, 1958.

90. Репринцева С. М., Федорович Н. В. О механизме теплообмена дисперсного материала в вертикальных трубах. Весці АН БССР, сер. фіз.-тэхн. навук, 1966.

91. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Особенности переноса радиационной энергии в дисперсных системах. В сб. «Тепло- и массообмен в сушильных и термических процессах». Мн., ИТМО АН БССР, 1971.

92. Репринцева С. М., Федорович Н. В. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 5. Мн., «Наука и техника», 1968.

93. Романков П. Г., Рашковская Н. Б. Сушка во взвешенном состоянии. М.—Л., «Химия», 1968.

94. Иванов А. П., Репринцева С. М., Драгун В. Л. Исследование влажностных характеристик кристаллоколлоидных и кристаллических материалов методом спектрального отражения. В сб.

- «Тепло- и массоперенос», т. 7. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.
95. Иванов А. П. и др. Истинная поглощательная способность некоторых химико-фармацевтических материалов. ИФЖ, XXII, № 4, 1972.
96. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Исследование процесса сушки многокомпонентных лекарственных препаратов в комбинированной сушилке системы ИТМО АН БССР. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1975.
97. Репринцева С. М., Чижик К. Г. Исследование процесса сушки норсульфазола и пирамидона. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1968.
98. Лыков А. В. Явление переноса в капиллярно-пористых телах. М., Гостехиздат, 1954.
99. Любошиц И. Л. Искусственная сушка фрезерного торфа. Труды Института энергетики, вып. V. Изд-во АН БССР, 1958.
100. Paulik J., Paulik F., Erdey L. Anal. Chim. Acta, 34, 419, 1966.
101. Doyle C. D. J. Appl. Polymer Sci S, 285, 1961.
102. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Гигроскопические свойства химико-фармацевтических препаратов (норсульфазол, пирамидон). В сб. «Тепло- и массоперенос в процессах сушки и термообработки». Мн., «Наука и техника», 1970.
103. Федорович Н. В. Термодинамические характеристики некоторых химико-фармацевтических материалов. В сб. «Процессы переноса тепла и массы при сушке различных материалов». Мн., ИТМО АН БССР, 1974.
104. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Некоторые особенности статки сушки кристаллоколлоидных лекарственных масс. В сб. «Повышение эффективности и совершенствования процессов и аппаратов химических производств». Львов, 1973.
105. Федорович Н. В., Раскина Е. А. Термодинамические характеристики полупродуктов витамина В₂. В сб. «Вопросы сушки и термообработки». Мн., ИТМО АН БССР, 1976.
106. Репринцева С. М. и др. Тепло и массообмен при сушке химико-фармацевтических препаратов в падающе-кипящем слое. В сб. «Тепломассоперенос», т. 6. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.
107. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Комбинированные методы сушки кристаллоколлоидных и кристаллических веществ. В сб. «Тепломассоперенос», т. 6. Мн., 1972.
108. Репринцева С. М., Федорович Н. В., Чижик К. Г. Особенности сушки дисперсных лекарственных и витаминных препаратов. В сб. «Теплофизика и технология сушильно-термических процессов». Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1975.

109. Федорович Н. В. Исследование действующей фармацевтической 110. Репринцева С. М. медицинских 1977.
111. Репринцева С. М. фармацевтический 112. Репринцева С. М. промышленно фармацевтический 113. Федорович Н. В. сушилки не фармацевтический 114. Репринцева С. М. процесса сушки комбинированной фармацевтической 115. Каганович Л. И. установки для 116. Лыков А. В. «Химия», 1970
117. Федорович Н. В. И. Исследование В сб. «Тепло- и массоперенос в различных материалах» 118. Красовский Л. И. Краткий обзор обмена при сушке 119. Красовский Л. И. Краткий обзор различных материалов 120. Красовский Л. И. 1973.
121. Федорович Н. В. Исследование фармацевтических материалов V Всесоюзный симпозиум ИТМО им. А. В. Лыкова 122. Федорович Н. В. тепло- и массоперенос в различных материалах союзных республик

109. Федорович Н. В., Репринцева С. М., Чижик К. Г. Исследование процесса сушки барбитуровой кислоты на непрерывно-действующей установке СМК системы ИТМО АН БССР. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1977.

110. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Методы сушки медицинских препаратов. «Химико-фармацевтический журнал», № 5, 1977.

111. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Сушка химико-фармацевтических препаратов. Будапешт, 1971.

112. Репринцева С. М. и др. Результаты испытания опытно-промышленного образца сушки непрерывного действия. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1972.

113. Федорович Н. В. и др. Опытно-промышленный образец сушилки непрерывного действия системы ИТМО АН БССР. «Химико-фармацевтический журнал», № 11, 1972.

114. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Исследование процесса сушки многокомпонентных лекарственных препаратов в комбинированной сушилке системы ИТМО АН БССР. «Химико-фармацевтический журнал», № 9, 1975.

115. Каганович Ю. Я., Злобинский А. Г. Промышленные установки для сушки в кипящем слое. М., «Химия», 1970.

116. Лыков М. В. Сушка в химической промышленности. М., «Химия», 1970.

117. Федорович Н. В., Репринцева С. М., Малюкович В. И. Исследование контактной сушки Са-соли хлортетрациклина. В сб. «Тепло- и массоперенос в процессах термообработки дисперсных материалов». Мн., ИТМО АН БССР, 1974.

118. Красников В. В. Контактный теплообмен и внешний массообмен при кондуктивной сушке. ИФЖ, XIX, 1970.

119. Красников В. В. Закономерности кинетики сушки влажных материалов. ИФЖ, XIX, 1970.

120. Красников В. В. Кондуктивная сушка. М., «Энергия», 1973.

121. Федорович Н. В., Репринцева С. М., Драгун В. Л. Исследование тепло- и массообмена в отдельной грануле химико-фармацевтических препаратов при радиационном подводе тепла. Материалы V Всесоюзной конференции по тепломассообмену, т. 8. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1976.

122. Федорович Н. В. Особенности механизма внутреннего тепло- и массопереноса в отдельной грануле химико-фармацевтических препаратов при радиационном подводе тепла. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процес-

- сов сушки и использованию новой техники. Теория сушки. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1977.
123. Бабенко В. Е. и др. Некоторые методы определения параметров кинетических и гидродинамических моделей при сушке сыпучих продуктов в аппаратах взвешенного слоя. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 6. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.
124. Белгородский М. Н., Голубев Л. Г. Выбор оптимального способа сушки для ряда термоустойчивых материалов. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 6. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.
125. Кошевой Е. П. и др. Исследование процессов сушки статистическими методами планирования экспериментов. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 6. Мн., ИТМО АН БССР, 1972.
126. Чуханов З. Ф. Некоторые проблемы топлива и энергетики. М., изд-во АН СССР, 1961.
127. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Исследование тепломассопереноса в противоточном двухфазном потоке при свободном падении дисперсного материала. В сб. «Тепломассообмен», т. 5. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1976.
128. Репринцева С. М. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов в аппарате СМК. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Теория сушки. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1977.
129. Репринцева С. М., Федорович Н. В., Сыроид Н. В. О скорости падения гранулированного материала при сушке лекарственных препаратов в падающем слое. Процессы переноса тепла и массы при сушке различных материалов. Мн., ИТМО АН БССР, 1974.
130. Бондарь А. Г. Математическое моделирование в химической технологии. Киев, «Вища школа», 1973.
131. Брандон Д. ISA Journal, № 7, 1959.
132. Блох А. Г. Тепловое излучение в котельных установках. М., «Энергия», 1967.
133. Шифрин К. С. Рассеяние света в мутной среде. М., Гостехиздат, 1951.
134. Чекалинская Ю. И. Спектроскопия светорассеивающих сред. Мн., изд-во АН БССР, 1963.
135. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Лучистый теплообмен в дисперсных средах. Мн., «Наука и техника», 1968.
136. Иванов А. П. и др. Истинная поглощательная способность некоторых химико-фармацевтических материалов. ИФЖ, XXII, № 4, 1972.
137. Гинзбург А. С. Инфракрасная техника в пищевой промышленности. М., «Пищевая промышленность», 1966.

138. Гинзбург А. С. в процессе радиационной сушки. М., издат, 1963.

139. Юбицкий В. И. Бенности. В сб. 1963.

140. Ильченко В. И. го теплообмена

141. Каталог микро-фармацевтики. 1974.

142. Репринцев В. И. и их использование в дифференциации по механизму фармацевтической промышленности.

143. Репринцев В. И. ный метод сушки и применение в отрасли. Ренции по интенсификации техники. Киев, изд-во АН УССР, 1974.

144. Репринцев В. И. линия производства освоение. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Теория сушки. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1977.

145. Репринцев В. И. и оборудование для сушки в отрасли. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Теория сушки. Мн., ИТМО им. А. В. Лыкова АН БССР, 1977.

146. Чухлебова В. И. барабанной сушилки. М., «Медицинская промышленность», 1974.

147. Александров В. И. тических материалов. М., «Медицинская промышленность», 1974.

148. Муравьев В. И. ратов. М., Медгиз, 1974.

149. Штербаков В. И. промышленности. М., Госхимиздат, 1963.

138. Гинзбург А. С., Рослякова О. И. Тепломассообмен в процессе радиационно-конвективной выпечки и выпечки инфракрасными лучами. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 3. М., Госэнергоиздат, 1963.

139. Юбиц В. Теплообмен инфракрасным излучением и его особенности. В сб. «Тепло- и массоперенос», т. 3. М., Госэнергоиздат, 1963.

140. Ильченко А. И. Исследование радиационно-кондуктивного теплообмена в кипящем слое. Автореферат канд. дис. Киев, 1968.

141. Каталог «Специальное технологическое оборудование химико-фармацевтической промышленности». М., ЦБНТИ, Медпром, 1974.

142. Репринцева С. М. и др. Новые методы и оборудование и их использование в отрасли. Тезисы докладов III Всесоюзной конференции по механизации и автоматизации процессов химико-фармацевтической промышленности. М., ЦБНТИ, Медпром, 1977.

143. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Комбинированный метод сушки медицинских препаратов и его серийное использование в отрасли. Материалы Всесоюзной научно-технической конференции по интенсификации процессов сушки и использованию новой техники. Киев, изд-во АН УССР, 1977.

144. Репринцева С. М. и др. Поточная механизированная линия производства таблеток, ее преимущества и промышленное освоение. Материалы III Всесоюзной конференции по комплексной механизации и автоматизации процессов в химико-фармацевтической промышленности. М., ЦБНТИ, Медпром, 1977.

145. Репринцева С. М., Федорович Н. В. Новые методы и оборудование для сушки медицинских препаратов и их использование в отрасли. Материалы III Всесоюзной конференции по комплексной механизации и автоматизации процессов в химико-фармацевтической промышленности. М., ЦБНТИ, Медпром, 1977.

146. Чухлебов К. С., Бакланов Л. И. Опыт применения барабанной сушилки в химико-фармацевтической промышленности. «Медицинская промышленность СССР», № 1, 1964.

147. Александров Б. С. Методы гранулирования фармацевтических материалов и их влияние на свойства гранулятов и таблеток. М., «Медицинская промышленность СССР», 1976.

148. Муравьев И. А. Технология лекарств и галеновых препаратов. М., Медгиз, 1961.

149. Штербачек З., Тауск П. Перемешивание в химической промышленности. Пер. с чешского. Под ред. И. С. Павлушенко. Л., Госхимиздат, 1963.

150. Репринцева С. М., Драгун В. Л. Применение спектро-

фотометрических методов для контроля и анализа лекарственных препаратов в ЦЗЛ. Материалы III Всесоюзной конференции по комплексной механизации и автоматизации процессов в химико-фармацевтической промышленности. М., ЦБНТИ, Медпром, 1977.

151. Репринцева С. М., Федорович Н. В., Драгун В. Л. О спектрах поглощения химико-фармацевтических препаратов. Весці АН БССР, сер. фіз.-энерг. навук, № 1, 1972.

152. Куц П. С. В сб. «Использование ИК-радиации в медицинской промышленности». Применение инфракрасной техники для терморadiационной обработки пищевых продуктов, биоматериалов и лекарственных препаратов. М., 1974.

153. Драгун В. Л. Исследование оптических характеристик химико-фармацевтических препаратов в инфракрасной области спектра. Автореферат канд. дис. Мн., 1972.

154. Государственная фармакопея СССР. Изд. 10-е. М., «Медицина», 1968.

Предисловие
ГЛА

Современное
тической про
ГЛА

Химико-фарма
и их классиф

- 2.1. Структура
препаратов
- 2.2. Определени
теплофизич
препаратов
- 2.3. Определени
цевтических
- 2.4. Исследован

ГЛА

Механизм и ос
цевтических ма
методов

- 3.1. Отличительн
дов сушки
- 3.2. Методики э
стей сушки
- 3.3. Результаты
ки химико-ф
- 3.4. Теоретическо
и алгоритмы

ГЛАВ

Промышленное
ция сушильн
4.1. Оп
т

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
—— ГЛАВА 1	
Современное состояние техники сушки в химико-фармацевтической промышленности	5
—— ГЛАВА 2	
Химико-фармацевтические препараты как объекты сушки и их классификация	18
2.1. Структура и классификация химико-фармацевтических препаратов в зависимости от различных факторов . . .	18
2.2. Определение сорбционно-десорбционных, реологических, теплофизических характеристик химико-фармацевтических препаратов	25
2.3. Определение реологических характеристик химико-фармацевтических материалов	51
2.4. Исследование теплофизических характеристик	63
—— ГЛАВА 3	
Механизм и особенности сушки дисперсных химико-фармацевтических материалов при использовании предложенных методов	70
3.1. Отличительные особенности и преимущества новых методов сушки	70
3.2. Методики экспериментального исследования закономерностей сушки химико-фармацевтических материалов . . .	78
3.3. Результаты экспериментального изучения механизма сушки химико-фармацевтических материалов	105
3.4. Теоретическое обоснование предложенных методов сушки и алгоритмы их расчетов	124
—— ГЛАВА 4	
Промышленное освоение новых методов сушки и конструкция сушильных установок	148
4.1. Опытнo-промышленное освоение нового метода сушки пастообразных материалов	154
	245

4.2. Экономическая эффективность внедрения сушильных устройств и перспектива использования их в других отраслях промышленности	155
--	-----

———— ГЛАВА 5

Технологический процесс производства гранулированных и таблеточных материалов, обеспечивающий поточность и управление на основе новых способов сушки	162
5.1. Основные характеристики таблеточной массы, определяющие эффективность непрерывной технологии производства таблеток	168
5.2. Технологическая схема и конструктивные узлы поточной линии	169
5.3. Технические показатели работы поточной линии, результаты опытно-промышленного освоения и перспективы использования	176
Приложение 1	184
Приложение 2	227
Литература	234

НАУ

Свет
Нина

НОВ
ТЕРМ
И СУ
ФАРМ
ПРЕД

Редак
Облож
Худож
Техни
Коррек

ИБ №

Печата
Сдано
25.06.79
№ 1.
Печ. л
Тираж
Издате
ский п
(Георг
ника»
БССР
ной тор

НАУКА И ТЕХНИЧЕСКИЙ ПРОГРЕСС

Светлана Михайловна Репринцева
Нина Викторовна Федорович

**НОВЫЕ МЕТОДЫ
ТЕРМООБРАБОТКИ
И СУШКИ ХИМИКО-
ФАРМАЦЕВТИЧЕСКИХ
ПРЕПАРАТОВ**

Редактор С. В. М а ш к а н о в а
Обложка Л. И. Соколова
Художественный редактор В. Ф. Гринкевич
Технический редактор А. В. Скакун
Корректор Т. И. Пасненкова

ИБ № 33

Печатается по постановлению РИСО АН БССР.
Сдано в набор 13.02.79. Подписано в печать
25.06.79. АТ 03604. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. тип.
№ 1. Гарнитура литературная. Печать высокая.
Печ. л. 7,75. Усл. печ. л. 13,02. Уч.-изд. л. 11,0
Тираж 1000 экз. Зак. № 312. Цена 1 р. 80 к.

Издательство «Наука и техника». Минск, Ленин-
ский проспект, 68. - Типография им. Франциска
(Георгия) Скорины издательства «Наука и тех-
ника» АН БССР и Государственного комитета
БССР по делам издательств, полиграфии и книж-
ной торговли. Минск, Ленинский проспект, 68.

В издательстве
«НАУКА и ТЕХНИКА»

готовится к печати книга

Л. Л. Васильев, Г. И. Боброва, С. А. Танаева. **Пористые материалы в криогенной технике.** На русском языке. 12 л. Цена 1 р. 50 к. (ориентировочно).

В книге рассматриваются оригинальные конструкции криогенной техники с пористыми элементами: криогенные тепловые трубы, паровые камеры, пористые сопла, пористые криогенные токопроводы, пористые токовводы и т. д. Приводятся результаты экспериментального исследования теплообмена в пористом криогенном кабеле, пористых токовводах, теплофизических характеристик конструкционных и теплоизоляционных материалов криогенной техники в диапазоне температур 10—400 К.

Рассчитана на сотрудников научно-исследовательских институтов, проектных организаций, конструкторских бюро, инженерно-технических работников, аспирантов и студентов высших учебных заведений.

*Заказы направлять по адресу:
220668, Минск, пл. Свободы, 19,
магазин «Книга — почтой».*



е-
с-
ии
ен-
та,
ды
ле-
по-
ик
лов
.
ль-
ор-
ан-

100000



10-33-12



О

С. М. ПЕРПИНЦЕВА; Н. В. ФЕДОРОВИЧ

1



HUNGRY GIRL

ВИНО И МЯСО



ЧЕСТНЫЕ ЦЕНЫ 450-238,41

ВИНА от 340₽

СТЕЙК на двоих

1 кг 999₽

ВИНА от 340₽

СТЕЙК на двоих

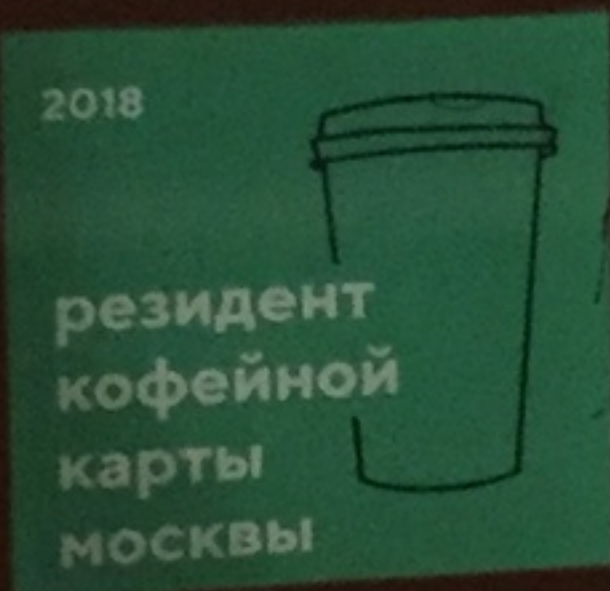
1 кг 999₽

ВИНА от 340₽

СТЕЙК на двоих 1 кг 999₽



КОФЕ
С СОБОЙ



КАННИБАЛ КОФЕ

ИП ИГОНИН ИВАН ЕВГЕНЬЕВИЧ
ИНН 132201958938 ОГРНИП 318132600027060

ЧАСЫ РАБОТЫ:

ПН - ПТ: 08:00 - 21:00

СБ - ВС: 09:00 - 21:00

119180, Г. МОСКВА,
УЛ. БОЛЬШАЯ ЯКИМАНКА, Д. 25

WWW.DOGFRIENDLYMAP.RU
100%
DOG-FRIENDLY



КАННИБАЛ КОФЕ













ALONE
in the
DARK

**ВСЕГДА
не верьте
тому что
кажется,
верьте
ТОЛЬКО
доказательствам.**



Чарльз Диккенс. «Большие надежды» 1861 г.